



# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

---

## “DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN”

---

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

**LUIS DANIEL SOSA RUIZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ**

ASESOR DE TESIS:

**DR. MANUEL ARIAS MONTIEL**

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, ABRIL DE 2017



*Dedicado a mi familia*



# Agradecimientos

A mis padres, Simeón y Aurea por todo su apoyo y valores que me han inculcado, así como por haberme brindado la oportunidad de recibir educación.

A mis hermanos Atzín y Marcos por tantos recuerdos de mi niñez y por su apoyo.

A Karen por permencer a mi lado en esos momentos felices pero más aun en los momentos difíciles.

A mi tía Victoria por su apoyo durante mis estudios en esta universidad.

A mi tío Ricardo por la donación hecha a este trabajo.

A mi abuela Epigmenia por su educación, cariño y paciencia.

A mi abuelo Bulmaro por su cariño y sus sabios consejos, Q.E.P.D.

Al Dr. Carlos por su tiempo y dedicación brindado a este trabajo de tesis, y por ayudarme a finalizarla de manera satisfactoria.

Al Dr. Manuel por sus observaciones tan acertadas que mejoraron en gran medida este trabajo.

A mis sinodales por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y las observaciones aportadas que sin duda alguna lo mejoraron.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por el apoyo ofrecido durante el desarrollo de este trabajo y a todos los que directa o indirectamente me apoyaron para la culminación del mismo.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	4
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	13
1.2.1. Delimitaciones . . . . .	13
1.3. Justificación . . . . .	14
1.4. Hipótesis . . . . .	15
1.5. Objetivos . . . . .	15
1.5.1. Objetivo general . . . . .	15
1.5.2. Objetivos particulares . . . . .	15
1.6. Metas . . . . .	16
1.7. Estructura del documento . . . . .	16
<b>2. Marco teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Sistema de dirección del automóvil . . . . .	17
2.1.1. Asistencia . . . . .	19
2.1.2. Dirección asistida hidráulica . . . . .	20
2.1.3. Dirección asistida eléctrica . . . . .	21
<b>3. Diseño y construcción de la plataforma</b>	<b>33</b>
3.1. Selección y caracterización de los resortes . . . . .	33
3.1.1. Cálculo de parámetros del resorte . . . . .	35
3.2. Caracterización de los resortes . . . . .	36
3.3. Mecanismo de emulación de fuerza de los neumáticos . . . . .	38
3.3.1. Análisis del cordón de soldadura . . . . .	39
3.4. Estructura de soporte . . . . .	42
3.5. Construcción de la plataforma . . . . .	46
<b>4. Sistema DAE e interfaz de comunicación</b>	<b>49</b>
4.1. Sistema DAE de Koyo Seiko Corporation . . . . .	49
4.2. Protocolo CAN . . . . .	51
4.3. Vehicle Spy® . . . . .	54
4.4. CAN-Bus Shield . . . . .	57
4.5. Comunicación . . . . .	58

---

<b>5. Acondicionamiento y adquisición de señales</b>	<b>61</b>
5.1. Sensor de corriente . . . . .	61
5.2. Acondicionamiento de la señal del sensor de par . . . . .	62
5.3. Circuito de acoplamiento del sensor de par . . . . .	65
5.3.1. Rectificador de precisión . . . . .	65
5.3.2. Amplificador de instrumentación . . . . .	68
5.4. Circuito de escalamiento . . . . .	69
<b>6. Resultados</b>	<b>73</b>
6.1. Inspección del mecanismo de emulación de fuerza . . . . .	73
6.2. Medición externa del par en la columna de dirección . . . . .	73
6.3. Comunicación con la DAE y activación de la asistencia . . . . .	76
6.4. Implementación del circuito de acoplamiento . . . . .	79
6.5. Caracterización del sensor de par . . . . .	81
6.6. Caracterización del motor de CD de la DAE . . . . .	82
<b>7. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>87</b>
<b>A. Gráficas y tablas utilizadas para la selección del resorte</b>	<b>89</b>
<b>B. Tablas para el análisis del cordón de soldadura</b>	<b>93</b>
<b>C. Resultados de la caracterización de los resortes</b>	<b>97</b>
<b>D. Análisis del amplificador de precisión</b>	<b>99</b>
<b>E. Análisis del circuito sumador</b>	<b>101</b>
<b>F. Código fuente de los algoritmos empleados</b>	<b>103</b>
<b>G. Dibujos técnicos</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>

# Índice de figuras

1.1.	Dudgeon Steamer, primer automóvil con volante (tomado de [9]). . . . .	5
1.2.	Mecanismo de paralelogramo de Jeantaud (tomado de [10]). . . . .	5
1.3.	Mecanismo desarrollado por Robertt E. Twyford (tomado de [11]). . . . .	6
1.4.	Sistema de dirección asistida hidráulica de Davis (tomado de [13]). . . . .	7
1.5.	Servodirección Electro-Hidráulica (tomado de [16]). . . . .	8
1.6.	Sistemas de dirección: a) Sistema de dirección de TRW (tomado de [20]). b) Dirección asistida tipo columna (tomado de [21]). . . . .	9
1.7.	Plataforma de HIL (tomado de [24]). . . . .	10
1.8.	Plataforma modular de pruebas desarrollada por Kiliñç y colaboradores (tomado de [28]). . . . .	11
1.9.	Simulador HIL de la empresa Koyo para evaluación de EPS (tomado de [29]). . .	11
1.10.	Plataforma de pruebas de un sistema steer-by-wire (tomado de [33]). . . . .	12
2.1.	Ángulo de avance formado entre el pivote y el eje vertical del neumático (tomado de [38]). . . . .	17
2.2.	Dirección por dedo-huesillo (Izquierda), tornillo sinfín-tuerca (Derecha) (tomado de [38]). . . . .	18
2.3.	Sistema de dirección que aplica mecanismos de desmultiplicación tipo dedo-huesillo o tornillo sinfín-tuerca (tomado de [38]). . . . .	18
2.4.	Sistema de dirección del automóvil (tomado de [38]). . . . .	19
2.5.	Mecanismo piñón-cremallera (tomado de [38]). . . . .	19
2.6.	Sistema de dirección asistida hidráulica (tomado de [4]). . . . .	20
2.7.	Retorno activo y par de asistencia (tomado de [5]). . . . .	22
2.8.	Gráfica comparativa entre las DAE y DHA (tomado de [5]). . . . .	23
2.9.	Velocidades para el ciclo de conducción ECE15 (tomado de [42]). . . . .	23
2.10.	Clasificaciones de las DAE: a) Tipo columna, b) Tipo piñón, c) Doble piñón y d) Tipo cremallera (imagen tomada de [45]). . . . .	25
2.11.	Diagrama de una DAE de tipo columna (C-EPS). . . . .	26
2.12.	Mecanismo tornillo sinfín-corona (tomado de [40]). . . . .	27
2.13.	Diagrama de la dirección del automóvil (tomado de [23]). . . . .	27
2.14.	Sensor de par torsional de no contacto de la empresa Koyo Seiko Corporation (tomado de [48]) . . . . .	28
2.15.	Diagrama eléctrico del sensor de par torsional de no contacto de la empresa Koyo Seiko Corporation (tomado de [49]) . . . . .	29

2.16. Diagrama a bloques de una DAE (tomada de [50]) . . . . .	30
2.17. Curvas de asistencia empleada por la UCE (tomada de [50]). . . . .	31
2.18. Tipos de curvas de asistencia (tomada de [51]). . . . .	31
3.1. Mecanismo de piñón-cremallera de Tsuru. . . . .	33
3.2. Mecanismos propuestos para aplicar carga al sistema DAE. . . . .	34
3.3. Resortes propuestos. . . . .	37
3.4. Máquina de ensayos Shimadzu Autograph AGS-J Series. . . . .	37
3.5. Gráfica de fuerza-deformación del resorte C. . . . .	38
3.6. Dimesiones del mecanismo. . . . .	39
3.7. Diagrama del mecanismo de sujeción de los resortes . . . . .	39
3.8. Forma geométrica del cordón de soldadura. . . . .	40
3.9. Esfuerzos en el punto A. . . . .	41
3.10. Diseño CAD del sistema piñón-cremallera (a), sistema piñón-cremallera modifi- cada(b). . . . .	42
3.11. Diseño CAD de la estructura de soporte inferior. . . . .	43
3.12. Ensamble de la estructura inferior. . . . .	43
3.13. Detalle del ensamble de la estructura inferior. . . . .	44
3.14. Modelo del sistema DAE. . . . .	44
3.15. Modelo de la estructura superior. . . . .	45
3.16. Ensamble final de la plataforma. . . . .	45
3.17. Construcción de la estructura superior. . . . .	46
3.18. Construcción de la estructura inferior. . . . .	46
3.19. Modificación del eje del piñón. . . . .	47
3.20. Plataforma de dirección automotriz asistida eléctrica. . . . .	47
4.1. Diagrama eléctrico de la UCE de la empresa Koyo (tomada de [40]). . . . .	50
4.2. Conector C1 y C3 (tomada de [57]). . . . .	51
4.3. Conector C2 (tomada de [57]). . . . .	51
4.4. Conexión del bus CAN de alta velocidad(a) y baja velocidad (b) (tomada de [63]).	53
4.5. Trama CAN (tomada de [62]). . . . .	54
4.6. Señales del bus can. . . . .	54
4.7. Intefaz gráfica del programa Vehicle Spy <sup>®</sup> . . . . .	56
4.8. Controlador de protocolo CAN: CAN-Bus Shield de Seed Studio <sup>®</sup> (tomado de [65]). . . . .	57
4.9. Circuito de alimentación y comunicación con la UCE de la DAE. . . . .	58
5.1. Sensor de corriente magnetorresistivo NT-50 (tomada de [67]). . . . .	61
5.2. Diagrama a bloques para la lectura del sensor de par(tomado de [68]). . . . .	62
5.3. Señal aplicada a las bobinas del sensor de par. . . . .	63
5.4. Circuito de simulación para las dos bobinas. . . . .	63
5.5. Medición de la inductancia de las bobinas. . . . .	64
5.6. Resultado de la simulación del circuito de las bobinas. . . . .	64
5.7. Diagrama a bloques del circuito de acoplamiento del sensor de par. . . . .	65

5.8. Circuito rectificador de precisión. . . . .	65
5.9. Comparación entre la entrada y la salida en el circuito rectificador de precisión. . . . .	66
5.10. Circuito de acoplamiento entre las bobinas y los rectificadores. . . . .	67
5.11. Voltajes rectificadas de las bobinas. . . . .	67
5.12. Diagrama del AD620(tomado de [72]). . . . .	68
5.13. Comparativa entre las salidas de los rectificadores y la del AD620. . . . .	69
5.14. Diagrama de la etapa de escalamiento. . . . .	69
5.15. Amplificador operacional en su configuración de sumador no inversor. . . . .	70
5.16. Regulador de voltaje LM317t(tomada de [73]). . . . .	71
5.17. Diodo zener en polarización inversa. . . . .	71
5.18. Circuito de escalamiento de las señales de par y corriente. . . . .	72
6.1. Medición del par en la columna de dirección. . . . .	74
6.2. Medición del par sin asistencia(a) y con asistencia(b)). . . . .	76
6.3. Comparación entre el par con y sin asistencia. . . . .	77
6.4. Comparativa entre la salida y la entrada del circuito rectificador implementado. . . . .	79
6.5. Comparativa entre la salida rectificada y después del filtro. . . . .	79
6.6. Comparativa de las señales rectificadas de la bobina de detección(amarillo) y compensación(azul). . . . .	80
6.7. Comparación de salida de los dos rectificadores(amarillo y azul) y la salida del AD620(morado) en reposo. . . . .	80
6.8. Comparación de salida de los dos rectificadores(amarillo y azul) y la salida del AD620(morado) aplicando un par. . . . .	81
6.9. Gráfica de la función obtenida de la caracterización de la señal del sensor de par. . . . .	83
6.10. Diagrama equivalente del motor de CD. . . . .	83
6.11. Caracterización del motor de CD. . . . .	84
6.12. Modelo del rotor. . . . .	84
A.1. Gráfica de cálculo de calibre de alambre (tomado de [54]). . . . .	90
B.1. Propiedades a la flexión de las soldaduras de filete(tomado de [76]). . . . .	94
B.2. Propiedades a la torsión de las soldaduras de filete(tomado de [76]). . . . .	95
B.3. Propiedades mínimas del metal de soldadura (tomado de [76]). . . . .	96
D.1. Rectificador de precisión ante entrada positiva(a) y entrada negativa(b) (tomado de [71]). . . . .	99
E.1. Amplificador operacional en su configuración de sumador no inversor. . . . .	101



# Índice de tablas

3.1. Dimensiones de los resortes candidatos. . . . .	37
3.2. Características del resorte elegido. . . . .	38
4.1. Pines del conector C2. . . . .	51
6.1. Medición del par de entrada a la columna de dirección sin asistencia en sentido horario. . . . .	75
6.2. Medición del par de entrada a la columna de dirección sin asistencia en sentido anti horario. . . . .	75
6.3. Resultados de la caracterización del sensor de par . . . . .	82
6.4. Medición de la corriente, velocidad angular y voltaje en el motor en estado estacionario . . . . .	85
6.5. Constantes del motor de CD de la marca Koyo® . . . . .	85
A.1. Tabla de los aceros típicos utilizados en el diseño de resortes(tomado de [54]). . .	89
A.2. Parámetros de cortante G de los aceros(tomado de [54] ). . . . .	91
C.1. Resultados del resorte A. . . . .	97
C.2. Resultados del resorte B. . . . .	98
C.3. Resultados del resorte C. . . . .	98



# Capítulo 1

## Introducción

El automóvil desde sus inicios ha experimentado diversos cambios, como la forma de ponerse en marcha ó la manera de conducirse. Durante los últimos años, se han realizado múltiples estudios para mejorar la experiencia de los conductores al volante: aumentar la eficiencia del motor, la aerodinámica del automóvil o mejorar el sistema de frenado. Otra área de desarrollo para mejorar el manejo del automóvil es el sistema de dirección asistida, [1]. El sistema de dirección en un principio fue únicamente de tipo mecánico, que debido al peso del automóvil, el usuario debía realizar un gran esfuerzo para manipular la dirección. Para remediar este problema, se desarrolló la dirección asistida, [2].

En 1926, Francis W. Davis construye la primera dirección asistida, de tipo hidráulico, es decir emplea un fluido bajo presión para generar una fuerza de asistencia al conductor, [3] y [2]. Sin embargo, el sistema hidráulico presenta grandes desventajas, y es que éste toma parte del par entregado por el motor del automóvil para la presurización del aceite, lo cual se ve reflejado en un mayor consumo de combustible. Otra de las desventajas es el hecho de que el sistema suele tener fugas de aceite y con esto se ve disminuida su eficiencia, además de la contaminación que este aceite causa, [4].

Con el propósito de eliminar las desventajas de los sistemas de asistencia hidráulicos, en 1981 fue desarrollado el sistema de dirección asistida eléctrica (DAE). Un sistema DAE, ayuda al conductor a ejercer una fuerza menor sobre el sistema de dirección a diferentes condiciones de manejo y velocidad. Para ello, la DAE requiere de las señales de velocidad del vehículo, del régimen del motor y del par ejercido por el usuario para determinar el nivel correcto de asistencia de fuerza. Cuando alguna de estas señales de retroalimentación falla, la DAE anula automáticamente la asistencia para seguridad del conductor.

Este sistema ha resultado más eficiente en comparación con los otros tipos de direcciones, ya que este utiliza un motor eléctrico el cual sólo se activa cuando el conductor aplica un par torsional en el volante, obteniéndose así un ahorro importante de energía, [5]. Por otro lado, con la DAE se eliminan todos los aditamentos necesarios en un sistema hidráulico, ocupando menos espacio y menor peso. El sistema mide, a través de un sensor, el par que el usuario está aplicando en la dirección, es entonces que mediante tablas y mediciones de parámetros del automóvil, tales como su velocidad y régimen del motor, la unidad de control eléctrica decide el par de asis-

tencia adecuado. Con esto se mejora en gran medida la experiencia del conductor al volante, [1].

Existen diversos tipos de dirección asistida eléctrica, pero los sistemas más utilizados son los de tipo columna que emplean motores de CD. Una gran cantidad de autos cuentan con esta tecnología, pero son pocos los centros de servicio y capacitación sobre estos sistemas, por lo que es pertinente proveer de una plataforma de pruebas para este tipo de sistemas. Los técnicos generalmente deben instalar la DAE en el automóvil para poder verificar que está funcionando correctamente en condiciones de manejo y carga.

Entre los múltiples trabajos de investigación de tipo educativo sobre direcciones asistidas eléctricas, se encuentra el realizado por Tuquinga y Mejía [6]. En tal trabajo se analiza el funcionamiento de la dirección del automóvil y de la dirección asistida eléctrica de manera general y se diseña un tablero didáctico para este sistema. En los sistemas de dirección asistida eléctrica son aplicadas múltiples leyes de control, como en [7] donde se utilizan técnicas de control LQR (linear quadratic regulator, por sus siglas en inglés) y un estimador de par del conductor, con el objetivo de mejorar el desempeño de la dirección y reducir los costos del sistema. Otros trabajos como el de Shwetha y colaboradores [8], presentan compensadores clásicos como el PD (proportional derivative, por sus siglas en inglés), para controlar la dirección asistida eléctrica de tipo columna.

Como puede verse, las DAE son un área de investigación importante y es primordial que la Universidad Tecnológica de la Mixteca incursione en el estudio e investigación de este tipo de sistemas. Este proyecto de tesis tiene como objetivo principal el construir una plataforma para la investigación de la dirección asistida eléctrica. Esta herramienta deberá permitir conocer el funcionamiento de la DAE y proporcionar las señales necesarias para la implementación de algoritmos de control propios.

## 1.1. Antecedentes

El sistema de dirección es uno de los sistemas más importantes en un automóvil, ya que a través de éste el usuario decide hacia dónde ir. En sus inicios, el sistema de dirección era totalmente mecánico y representaba para el usuario un gran esfuerzo manipularlo debido al peso del automóvil. Es por ello que se inventaron sistemas de asistencia de fuerza de tipo hidráulico, electrohidráulico, servo electrohidráulico y eléctrico.

El primer vehículo que incluyó un volante en el sistema de dirección fue probablemente el Dudgeon Steamer en 1857, véase la figura 1.1, años después la primer persona en instalar un sistema de asistencia en un automóvil fue un hombre de apellido Fitts en 1876, aunque no se conoce más detalles de este hecho, [10]. En 1878 el francés Jeantaud inventa el primer sistema mecánico de viraje de dirección por paralelogramos lo cual disminuye el esfuerzo del usuario al manipular la dirección, el mecanismo es ahora llamado de Pitman, véase figura 1.2. Fue ya en 1885 cuando el automóvil Benz incluyó el sistema piñón cremallera como mecanismo de dirección y en 1905 fue utilizado por el Cadillac, [10].

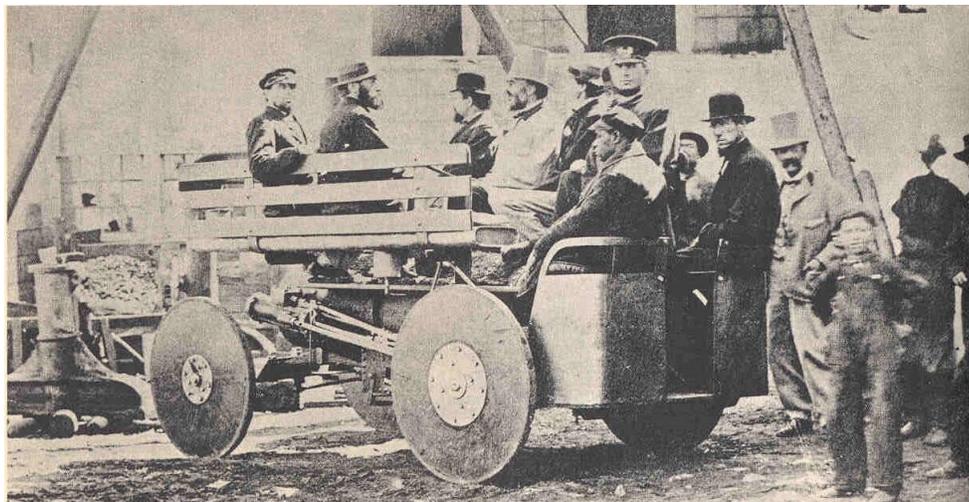


Figura 1.1: Dudgeon Steamer, primer automóvil con volante (tomado de [9]).

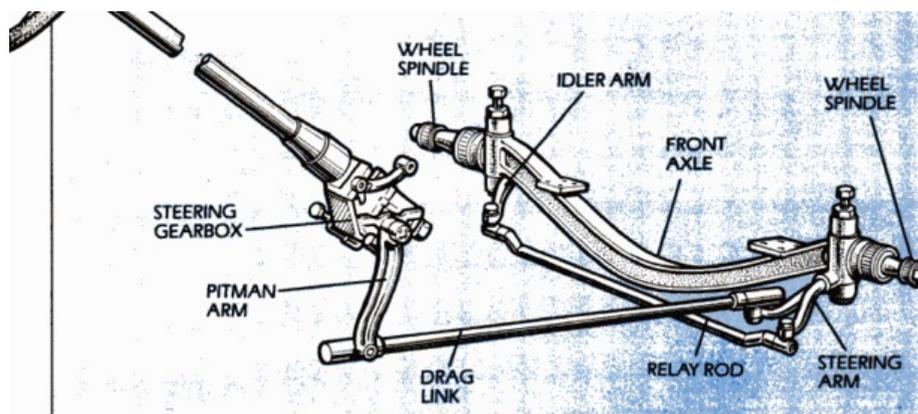


Figura 1.2: Mecanismo de paralelogramo de Jeantaud (tomado de [10]).

Para evitar transmitir las irregularidades del camino el Daimler Parisian fue el primer automóvil con un ángulo de inclinación de la columna de dirección, esto sucedió en el año 1900, fue en éste mismo año cuando Robertt E. Twyford patentó una dirección asistida mecánicamente para poder maniobrar las cuatro llantas del automotor, [11], en la figura 1.3 se muestra un diagrama de su mecanismo. Tres años después se instaló un sistema de dirección asistida en un camión Columbia de 5 toneladas. Éste empleaba un motor eléctrico para manipular el sistema de dirección, [10].

En los inicios del siglo 20 los automóviles empezaron a ser más pesados y rápidos, además de que las llantas sólidas fueron sustituidas por neumáticos. La necesidad de disminuir más el esfuerzo surge, para lograr esto en 1908 el modelo T de Henry Ford agrega un sistema reductor de tipo tornillo sinfín corona entre el volante y el mecanismo de Pitman. Posteriormente con el objetivo de reducir el contacto, producto del mecanismo tornillo sinfín y corona, se sustituye éste por el mecanismo de bolas recirculantes y tornillo en el año 1923, véase [10].

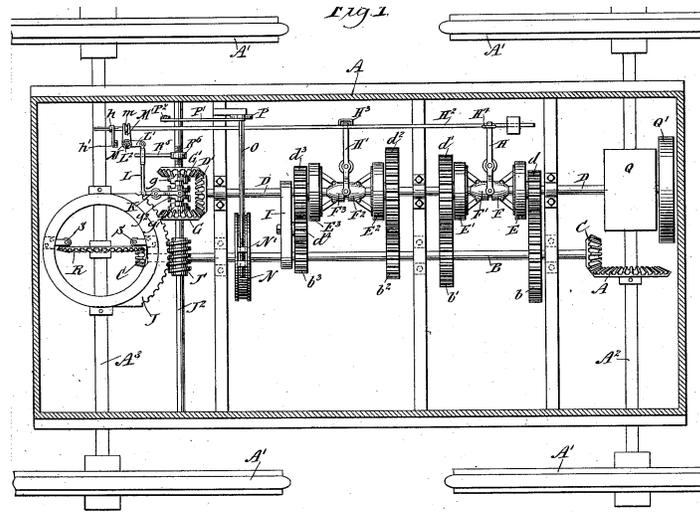


Figura 1.3: Mecanismo desarrollado por Robertt E. Twyford (tomado de [11]).

Desde 1903 múltiples mecanismos de dirección asistida fueron apareciendo, aplicados en camiones, algunos operando por vacío y otros por aire comprimido, hasta que en 1926 Francis W. Davis obtuvo una patente de dirección asistida hidráulica o HPAS (Hydraulic Power Assisted Steering por sus siglas en inglés) y la colocó en un automóvil de la empresa Pierce Arrow, [12]. Este sistema hace uso de una bomba hidráulica, impulsada por el motor de combustión mediante bandas en V. Esto para mover el fluido hidráulico y aplicar la asistencia en la cremallera del mecanismo de dirección mediante un pistón. Este pistón era operado por una válvula rotativa para elegir el sentido en el que se aplica la fuerza. Dicha válvula está conectada a la columna de dirección; Davis también agregó un resorte espiral entre la válvula y la columna para evitar el sobreviraje, este sistema puede observarse en la figura 1.4.

Fue la empresa Vickers Co. quien la manufacturó en 1928 y con el cual se convirtió en un estándar para los automóviles posteriores. Con este sistema se lograba disminuir en gran medida el esfuerzo del operador al volante. Otro beneficio que se obtiene en comparación a las direcciones puramente mecánicas es el efecto amortiguador que provee el sistema hidráulico a movimientos bruscos que se transmiten al volante causados por las irregularidades del camino, [14]. En 1951 Chrysler Corporation introdujo de manera comercial los primeros sistemas de dirección asistida que se basa en la patente de Davis en el Chrysler Imperial al cual llamó Hydraguide, [2]. G.M. lo incluyó en el Cadillac en 1954, [10].

Debido a que la bomba hidráulica es impulsada por el motor de combustión en el sistema de Davis, la cantidad de flujo está determinada por la velocidad del mismo y cuando el volante no es virado, el fluido sólo circula a través de la válvula, dando como resultado mayor ineficiencia. Debido a la dependencia del motor de combustión surge también el problema de que la bomba provee demasiado caudal con el automóvil a alta velocidad y por lo tanto genera demasiada asistencia, la cual no es necesaria, y cuando el motor está en ralentí (revoluciones por minuto mínimas necesarias para mantener el motor encendido) no se ofrece la asistencia requerida, [13].

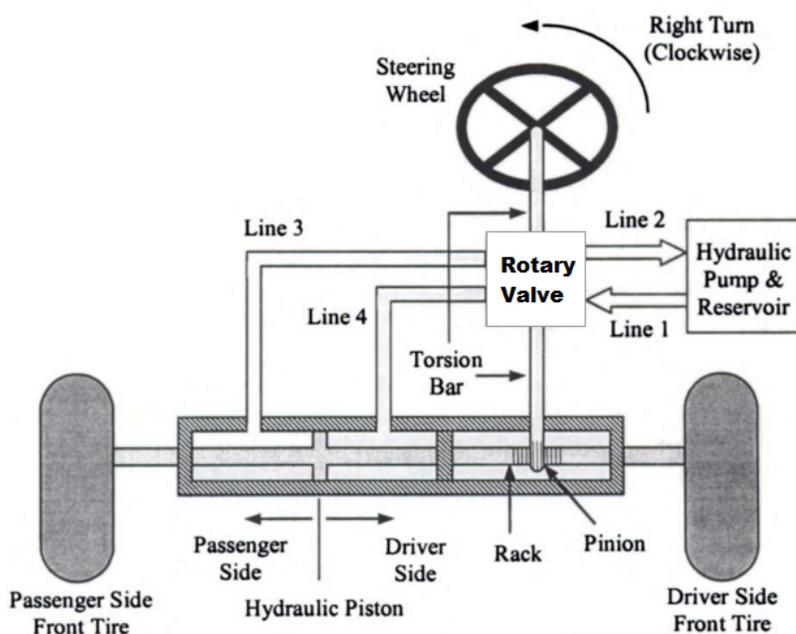


Figura 1.4: Sistema de dirección asistida hidráulica de Davis (tomado de [13]).

Debido a los inconvenientes de las HPAS surge la Dirección Asistida Electro-hidráulica o EHPS (Electro-Hydraulic Powered Steering por sus siglas en inglés), en 1965 por la empresa Ford como parte de un automóvil experimental, [15]. Este sistema utiliza un motor eléctrico, conectado a la batería, para impulsar la bomba hidráulica, eliminando así su dependencia del motor de combustión, [14], lo cual genera las siguientes ventajas frente a las HPAS: La unidad de presurización (bomba y motor eléctrico) pueden ser colocados estratégicamente en relación a espacio y seguridad, la asistencia está garantizada incluso cuando el motor de combustión no opera y la dependencia del motor de combustión es eliminada logrando así ahorrar combustible.

A pesar de esto, el sistema ofrecía la misma cantidad de asistencia independientemente de las necesidades que surgen durante la conducción. Para remediar esto surge la Servodirección Electro-Hidráulica o EPHS (Electrically Powered Hydraulic Steering por sus siglas en inglés) en 1987, [17]. Este sistema tiene la característica de que la velocidad de la bomba es controlada por una unidad electrónica para modificar la presión y flujo, adaptándose así a las condiciones de manejo, específicamente de la velocidad del vehículo y la velocidad de giro del volante, [18], véase la figura 1.5. Para medir este último parámetro se agrega un sensor de ángulo en el volante y la velocidad del vehículo es tomado por la unidad de control a través del bus CAN (controller area network, por sus siglas en inglés). Este sistema compacta la bomba de presión de engranes, motor eléctrico, depósito de fluido y unidad de control, ahorrando así más espacio, [18], [19]. Con la aparición de los sistemas EPHS se tuvo un gran avance en los sistemas de asistencia hidráulicos, pero los aditamentos utilizados para generar la asistencia los hace pesados, espaciosos y estos nos generan mucha variabilidad en cuestión de asistencia.

Fue en 1981 cuando Gilbert Druotch, ingeniero de la empresa TRW, obtuvo la patente de un sistema de dirección asistida eléctrica o DAE, que consistía de un motor eléctrico de



Figura 1.5: Servodirección Electro-Hidráulica (tomado de [16]).

armadura hueca que permitía que la cremallera pasara a través de él, veáse la figura 1.6a. El motor transmitía la fuerza a la cremallera mediante un mecanismo de bolas recirculantes y un espiral, [20]. Sin embargo, el consumo de energía era tal que descargaba la batería en poco tiempo, sobre todo durante las maniobras para estacionarse ya que es cuando se exige mayor par de asistencia [4]. En 1988 la empresa Koyo introdujo la dirección asistida eléctrica de tipo columna, la cual usa un motor de CD en la columna de dirección y a través de un mecanismo de tornillo sinfín-corona transmite el par de asistencia, tal como se muestra en la figura 1.6b.

Posteriormente, surgieron otras configuraciones del sistema de asistencia como son: el de tipo piñón y el de doble piñón. Estos sistemas aplican la asistencia directamente sobre la cremallera mediante el piñón de la columna de dirección o con un piñón extra respectivamente. Estas configuraciones y la desarrollada por TRW son más complejas y costosas, por lo que son aplicadas solamente en automóviles pesados o de gama alta. Siendo entonces la dirección eléctrica de tipo columna la más utilizada en los automóviles debido a su simplicidad, [22], [4].

La DAE tienen la principal ventaja de omitir todos los aditamentos necesarios en un circuito hidráulico, reduciendo con esto más el peso y el espacio a ocupar. Otro beneficio que se obtiene de este sistema es una mayor variabilidad de la cantidad de asistencia dado que solo se manipulan señales eléctricas y lográndose también con esto mayor precisión.

A partir de su aparición la DAE se ha ido mejorando. Fue Bertollini y Hogan que en 1999 diseñaron un mapa o gráfico mediante el cual el sistema de control puede elegir el nivel de par de asistencia. Dicho mapa fue desarrollado mediante la inclusión de variables tales como la velocidad del vehículo y el par ejercido por el conductor, [23].

Una característica muy importante de la dirección de un automóvil es que, una vez que el automóvil ha salido de una curva, el volante retorna por sí sola a la posición central. Al inicio, cuando la dirección era totalmente mecánica, el ángulo de avance de las llantas permitía que

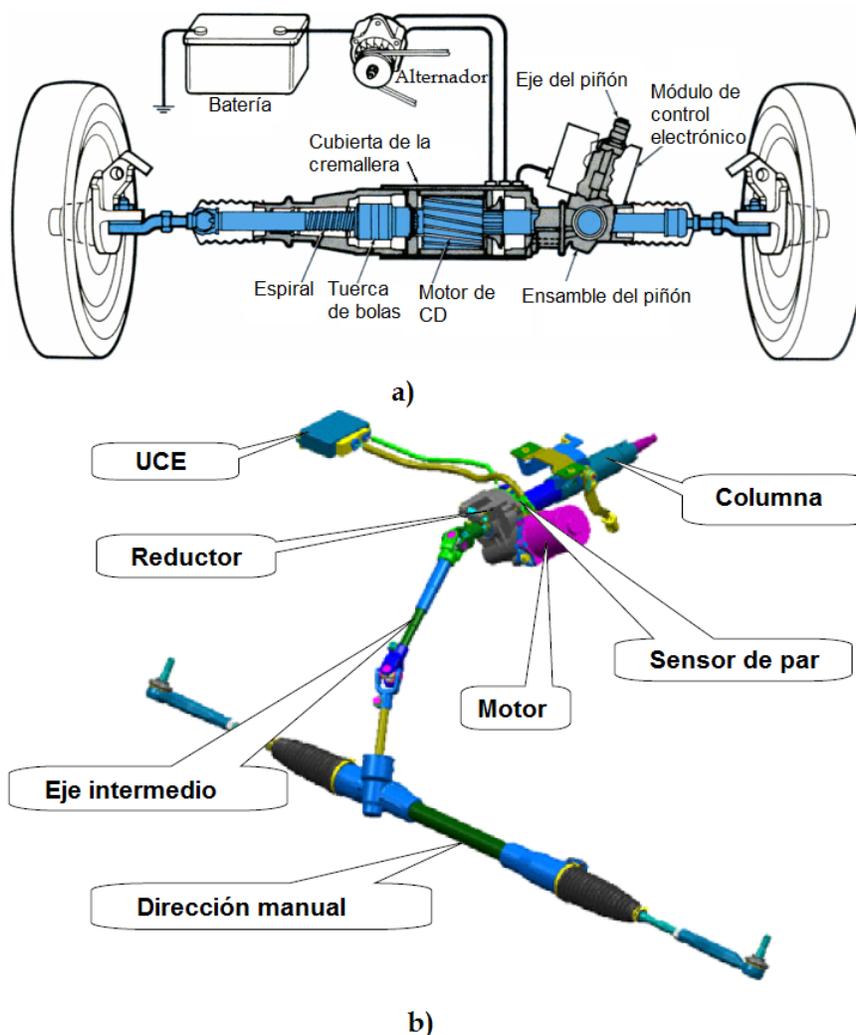


Figura 1.6: Sistemas de dirección: a) Sistema de dirección de TRW (tomado de [20]). b) Dirección asistida tipo columna (tomado de [21]).

estas viraran al centro por la fuerza que el camino ejerce sobre ellas. En el caso del sistema de tipo columna, debido a la resistencia adicional que ejerce el arreglo tornillo sinfín-corona sobre la dirección, el usuario debe ayudar a dicho retorno. Fue entonces cuando en el año 2000 Kurishige desarrolló una estrategia de control para el retorno al centro del volante, esto es conocido como retorno activo, [25]. A partir de esto, los avances y desarrollos que se hacen respecto a la dirección asistida eléctrica es en el ámbito de las estrategias de control para el motor eléctrico y por consiguiente, el par de asistencia entregado.

En lo que respecta a las plataformas de desarrollo de estos sistemas, se han hecho algunas investigaciones, como la realizada por Tuquinga y Mejía en [6]. Ellos desarrollaron un tablero didáctico que permite al usuario visualizar a gran detalle el funcionamiento de la dirección asistida eléctrica, además de poder hacer pruebas de fallas, y variación de parámetros como la velocidad del vehículo y revoluciones del motor de combustión interna. Alvarado y Díaz implementaron en [26] un sistema de freno de disco para emular la fuerza de resistencia de los neumáticos.



Figura 1.7: Plataforma de HIL (tomado de [24]).

También se han desarrollado sistemas para pruebas, validación y mejoramiento de direcciones asistidas eléctricas, como las plataformas Hardware-in-the-Loop (HIL), [27], las cuales emulan un sistema mediante réplicas físicas y virtuales de sus subsistemas que interactúan entre sí. Un ejemplo de este tipo de sistemas HIL, es el desarrollado en [24], donde se utiliza motores de CD Brushless para replicar las fuerzas en la cremallera de la dirección. Estos motores responden a un controlador que utiliza la velocidad del vehículo (la cual es emulada) y el ángulo del volante para generar la fuerza correspondiente, véase la figura 1.7.

Kiliñç y colaboradores desarrollaron en [28] una plataforma de pruebas modular con dos configuraciones. La primera usa dos motores para la fuerza a lo largo de la cremallera y un motor extra para controlar el par y ángulo del volante. La segunda configuración emplea cuatro pistones hidráulicos para generar no solo la fuerza longitudinal en la cremallera sino también fuerzas transversales a ésta. Además, usa un motor eléctrico para controlar el volante. La principal diferencia entre las dos configuraciones es que la primera es utilizada para pruebas de los algoritmos de asistencia y la última es usada para pruebas de durabilidad del sistema de dirección asistida, dicha plataforma se puede apreciar en la figura 1.8.

Por su parte, Segawa *et al.* [29] desarrollaron para la empresa Koyo un simulador HIL para trabajos de evaluación de sus sistemas DAE enfocándose en los de tipo columna. Un modelo simplificado del automóvil es utilizado para estimar la fuerza que se genera en los neumáticos. Dicho modelo es implementado en una computadora, esta recibe como señal de entrada el ángulo de giro del volante y tiene como salida principal un par de referencia. El par es traducido como

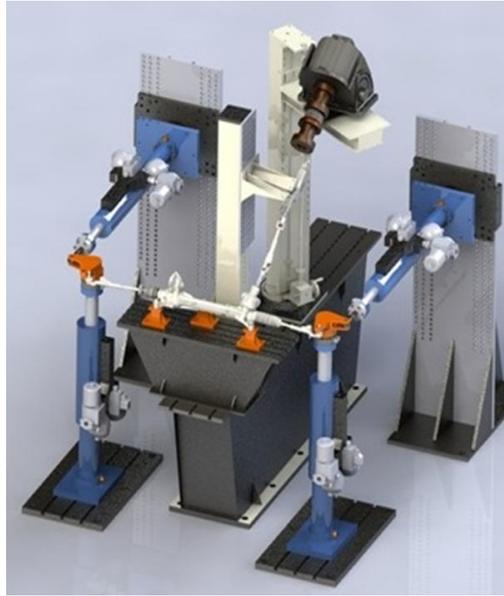


Figura 1.8: Plataforma modular de pruebas desarrollada por Kiliç y colaboradores (tomado de [28]).

una fuerza en la cremallera de la dirección mediante un servomotor de AC y un sistema de bolas recirculantes y sinfín, la plataforma es mostrada en la figura 1.9.

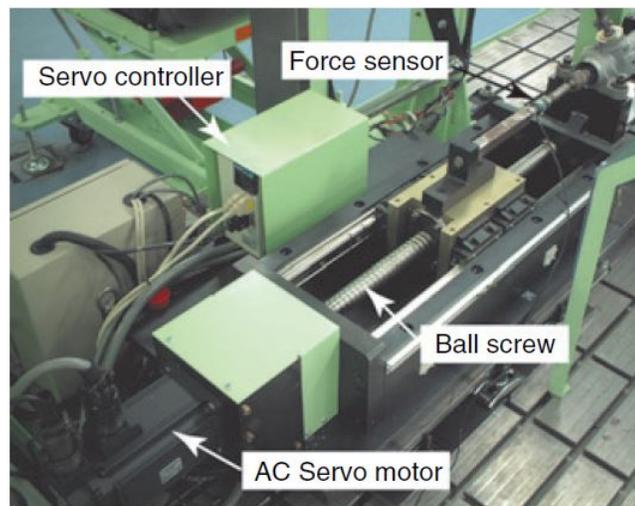


Figura 1.9: Simulador HIL de la empresa Koyo para evaluación de EPS (tomado de [29]).

En [30] se menciona que un sistema DAE actual se comunica al menos con el módulo de control ABS y señales del motor de combustión interna mediante la red CAN esto para ofrecer una asistencia más óptima. La aplicación de DAE más avanzada usa motores sin escobillas pero se mantiene el mismo algoritmo de medición de par y posición del volante para establecer la cantidad de asistencia. La principal diferencia entre los sistemas actuales y los anteriores es la mayor resolución de los sensores de par y posición, estos detectan cambios pequeños.

El objetivo primordial de los fabricantes es el aumento del ahorro de combustible, para ello se pretende en un futuro el desarrollo de sistemas de dirección asistida mas inteligentes. Por ejemplo sistemas DAE que funcionan en conjunto con el ABS para hacer pequeñas correcciones y mantener el vehículo en línea recta; esto se aplica por ejemplo cuando las llantas se encuentran en superficies con diferente tracción. La dirección adaptativa o activa es otro ejemplo del futuro de las DAE, esta cambia la relación que existe entre el volante y el rack la cual en los automóviles actuales es fija. La relación cambia constantemente con la velocidad del vehículo optimizando la respuesta de la dirección en todas condiciones. Al estacionarse en lugares pequeños el vehículo se hace más ágil y fácil de girar y a velocidades altas la dirección activa permite que el vehículo reaccione con mayor suavidad y precisión a las ordenes del conductor, véase [31].

Koyo Seiko está actualmente desarrollando otras tecnologías para el manejo del automóvil como lo es la conducción por cable (steer-by-wire por sus siglas en inglés), un nuevo mecanismo diferente al piñon-cremallera, estacionamiento automático y la conducción inteligente o ITS (Intelligent Transport System). En lo que respecta al ITS la idea principal es hacer que la DAE no solo sirva para el viraje de las llantas, sino que este interactúe y se encuentre en constante comunicación con los otros sistemas del automóvil, y con ayuda de sensores y cámaras reducir la carga del usuario al conducir, véase [31].



Figura 1.10: Plataforma de pruebas de un sistema steer-by-wire (tomado de [33]).

Hablando de la conducción por cable; en estos sistemas de asistencia se elimina por completo la unión mecánica entre el volante y la cremallera, Segawa en [32], menciona que uno de los problemas de este tipo de sistemas es el que ocurre precisamente al momento de fallar, debido a que debe ofrecer inmediatamente al conductor la posibilidad de maniobrar el automóvil, para esto Koyo desarrolló un embrague (clutch), el cual se activa en caso de fallo para establecer una unión entre el volante y la columna de dirección. Este mecanismo tiene el inconveniente de producir un par reactivo si en el momento de la unión las llantas y el volante están en ángulos opuestos. Para evitar o reducir este par reactivo Koyo propone el uso de un sistema de engranes planetarios y un motor eléctrico para que éstos sigan en todo momento el ángulo del

volante y evitar así el par reactivo al momento de establecer la unión. A pesar de esto uno de los principales beneficios de que obtiene de la tecnología steer-by-wire es que en caso de choque el conductor no corre el peligro de ser dañado por la columna de dirección, como ocurre con los anteriores sistemas de dirección.

También se han hecho investigaciones de plataformas de pruebas para sistemas steer-by-wire, como el desarrollado por Wagner *et al*, en [33], donde se utiliza un controlador no lineal para asegurar que el mecanismo de dirección siga al operador y al mismo tiempo ajuste una fuerza de retroalimentación para el usuario, en resumen se trata de un sistema háptico, véase [34]. Además de esto se ofrece un entorno virtual de manejo con el cual el usuario puede tener cierto conocimiento de lo que sucedería en un entorno real, la plataforma se muestra en la figura 1.10.

Sulakhe menciona en [1] que las DAE tienen que demostrar que son lo suficientemente fiables y seguras para el usuario para que estas entren en el mercado de manera mas profunda, menciona también que la conducción automática es el siguiente paso para las DAE aunque es necesario que estas tengan redundancias múltiples para mayor seguridad.

## 1.2. Planteamiento del problema

De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores, se establece el siguiente planteamiento del problema:

*Diseñar, construir y caracterizar una plataforma experimental de dirección asistida eléctrica de tipo columna basada en un modelo comercial. Para fines didácticos, esta plataforma debe permitir apreciar el sistema completo de dirección y a través de su unidad de control electrónica realizar pruebas del dispositivo en condiciones de carga. Es necesario que la plataforma pueda proveer al sistema un método de emulación de la fuerza de oposición de los neumáticos, todo en un espacio de confinamiento reducido. Con el objeto de que la plataforma pueda ser empleada con fines de investigación, la arquitectura de la DAE debe ser abierta, es decir, dicha plataforma debe permitir al usuario tener acceso a variables como el par torsional aplicado por el conductor y la corriente del motor, y además debe permitir hacer las modificaciones que se requieran según el objeto de estudio.*

### 1.2.1. Delimitaciones

Los alcances de esta tesis están definidos por el diseño, construcción, instrumentación y validación del funcionamiento de la plataforma experimental, sin embargo el desarrollo de leyes de control para determinar el nivel de asistencia no ha sido considerado como parte de esta tesis, sino como trabajo futuro de investigación.

### 1.3. Justificación

Existen diversas razones para la realización del tema de tesis propuesto, como son:

- Actualmente ahorrar energía es el camino más eficaz para reducir las emisiones de gases contaminantes. La tecnología de la DAE permite ahorrar energía ya que ejerce un par de asistencia solo cuando el conductor vira el volante y en una magnitud apropiada de acuerdo a la velocidad del automóvil, [5]. La mayor parte del tiempo, durante la conducción, el volante es virado mínimamente. En cambio las direcciones hidráulicas, electrohidráulicas y servo electrohidráulicas requieren que la bomba hidráulica opere continuamente para mantener una presión constante en el fluido extrayendo durante más tiempo energía de la batería y/o el motor del automóvil que la DAE. Además, al eliminar los aditamentos hidráulicos se reduce el peso del automóvil ahorrando más combustible. Es por esta razón que es importante promover el estudio e investigación de esta tecnología.
- Desde el punto de vista didáctico, una plataforma de este tipo permitirá a los estudiantes de ingeniería comprender el funcionamiento de un sistema mecatrónico empleado en la industria automotriz, para otros adquirir las habilidades de mantenimiento a sistemas similares y en general fomentar el interés de las futuras generaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías a través de la innovación.
- El desarrollo de esta tecnología de asistencia eléctrica es un tema de investigación vigente. Por citar algunos ejemplos, en [35] se presenta el diseño de un sistema de control multi agente para una DAE, con la finalidad de controlar cada elemento relacionado con la dirección. Por otro lado, en [36], se desarrolla gráficas de asistencia para una DAE, adaptándose a las condiciones y características de un montacargas, tales como el peso de la carga y velocidad.
- La DAE es un sistema elemental de asistencia de fuerza, por lo que su estudio e investigación puede generar el conocimiento para el estudio de sistemas más complejos de asistencia de fuerza, como los exoesqueletos [37].
- La plataforma puede ser utilizada para el desarrollo de algoritmos de control que faciliten la conducción de un automóvil a personas con desventajas físicas.
- Este tipo de sistema no ha sido implementado en la Universidad Tecnológica de la Mixteca por tanto resulta una buena oportunidad de incursionar en el aprendizaje, investigación y enseñanza de ellos.

Por todas estas razones este tema de tesis es pertinente a la carrera de Ingeniería en Mecatrónica.

## 1.4. Hipótesis

Para responder a las preguntas de investigación planteadas se formulan las siguientes hipótesis:

- ✓ *A partir de un sistema de dirección asistida eléctrica de tipo columna de la marca Koyo Seiko es posible diseñar y construir una plataforma experimental que permita realizar pruebas del dispositivo en condiciones de manejo y carga fuera del automóvil.*
- ✓ *Mediante el uso de un microcontrolador y un módulo de comunicación CAN es posible emular las señales necesarias para que la unidad de control electrónica de la DAE sea operativa y el sistema de asistencia de fuerza funcione sin necesidad de encontrarse instalada en el automóvil.*
- ✓ *Mediante el uso de un circuito de acondicionamiento de señal es posible monitorear el par aplicado por el usuario y la corriente del motor de la DAE.*

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

Diseñar y construir una plataforma de estudio de dirección asistida eléctrica a partir de un sistema DAE comercial de la marca Koyo Seiko, reproduciendo las señales del vehículo necesarios para el funcionamiento del sistema y emulando la resistencia de los neumáticos mediante el uso de resortes.

### 1.5.2. Objetivos particulares

1. Diseñar una estructura que sostenga la columna de dirección.
2. Diseñar el resorte necesario para emular la fuerza de resistencia de los neumáticos.
3. Obtener resortes comerciales, caracterizarlos y hallar uno similar al diseñado.
4. Construcción de la estructura.
5. Emular las señales eléctricas necesarias para la unidad de control eléctrica.
6. Puesta en marcha de la dirección asistida eléctrica mediante las señales de comunicación emuladas.
7. Adquisición y visualización del par aplicado.
8. Caracterización del sensor de par.

## 1.6. Metas

Para poder cumplir con los objetivos planteados, se propone la siguiente meta:

- ✓ Construir un prototipo para la realización de pruebas e investigación en un sistema DAE comercial fuera del automóvil

## 1.7. Estructura del documento

Este documento está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta una descripción de la dirección asistida hidráulica y posteriormente se aborda la dirección asistida eléctrica. Se presentan los elementos que constituyen al sistema, las características, ventajas y desventajas, así como la clasificación de las DAE.

En el Capítulo 3 se presenta el diseño estructural de la plataforma y del mecanismo de emulación de la fuerza de oposición de los neumáticos. Debido a que este mecanismo emplea resortes, se presenta su diseño, la caracterización de tres resortes similares al diseñado y finalmente la elección de uno de ellos. Con el objetivo de asegurar un correcto funcionamiento de la plataforma, se presenta un análisis de la resistencia mecánica del cordón de soldadura utilizado para la sujeción de los resortes. Finalmente, se muestra el proceso de manufactura aplicado para la construcción de la plataforma, así como de los detalles surgidos durante el mismo.

El Capítulo 4 se describe la distribución física del sistema de comunicación de la DAE del automóvil Pontiac G5. Posteriormente se ofrece una introducción al protocolo de comunicación CAN 2.0 en la que describen las principales características de las capas presentes en este protocolo. Se describe el software Vehicle Spy<sup>®</sup> comúnmente utilizado para el diagnóstico del automóvil, el cual en este caso es utilizado para obtener una simulación de las tramas que son empleadas para la activación de la dirección. Finalmente se presentan los dispositivos y algoritmos utilizados para establecer la comunicación con la DAE.

En el Capítulo 5 se describen el sensor de par y corriente del motor y de acuerdo a sus características se propone un circuito para el acoplamiento y tratamiento de dichas señales, las cuales están presentes en el sistema de dirección asistida eléctrica. Finalmente se realizan las simulaciones de cada una de las etapas de este circuito.

En el Capítulo 6 se presenta la implementación del circuito de acoplamiento en la plataforma de dirección asistida eléctrica y los resultados obtenidos de ésta. También se presentan los resultados obtenidos de la comunicación CAN con la UCE(unidad de control eléctrica) de la DAE. Se realiza la caracterización del sensor de par y del motor de corriente directa. Finalmente en el Capítulo 7 se incluye una sección de conclusiones y trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Marco teórico

En este capítulo se presentan los principales elementos que componen a la dirección mecánica del automóvil que se han desarrollado y se define el término de asistencia así como la razón de su empleo. Además, se describen los elementos que conforman la dirección asistida hidráulica y dirección asistida eléctrica, sus ventajas y desventajas. También, se realiza una comparación entre estos tipos de asistencia, en la que se destaca la superioridad de la DAE, debido a factores como la eliminación de la contaminación por el aceite hidráulico y el ahorro de combustible. Se describen los tipos de gráficas que utiliza la unidad de control electrónica de la DAE para establecer la asistencia, así como su clasificación. Finalmente se presenta la clasificación de las DAE dependiendo de su configuración.

### 2.1. Sistema de dirección del automóvil

El sistema de dirección es el encargado de permitir la correcta orientación de las ruedas y la conducción de un automóvil, y junto con el sistema de frenado son los elementos del vehículo que realizan las tareas más importantes y críticas en relación a la seguridad del conductor, [38] y [1].

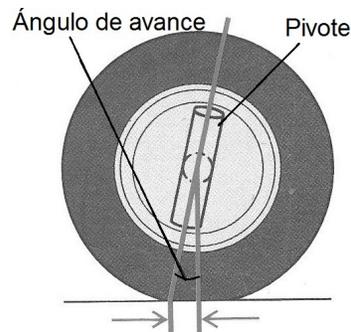


Figura 2.1: Ángulo de avance formado entre el pivote y el eje vertical del neumático(tomado de [38]).

Cualquier mecanismo de dirección debe ser: preciso, fácil de manejar, no debe transmitir las irregularidades del camino y ser restituible, esto es, que las ruedas delanteras tiendan a

retornar a su posición central después de salir de una curva, [38]. El hecho de que la llantas delanteras retornen a su posición neutral, y por consiguiente el volante también, depende de muchos factores, dentro de los que se hallan la geometría de los mecanismos de dirección y suspensión; y la flexibilidad de los neumáticos, pero uno de los más importantes es el ángulo de avance, veáse [38]. Santiago menciona en [6], que el ángulo de avance se forma entre el eje vertical del centro de la rueda y la prolongación del eje del pivote como se muestra en la figura 2.1.

Es precisamente este ángulo el que permite que la rueda retorne a su posición central una

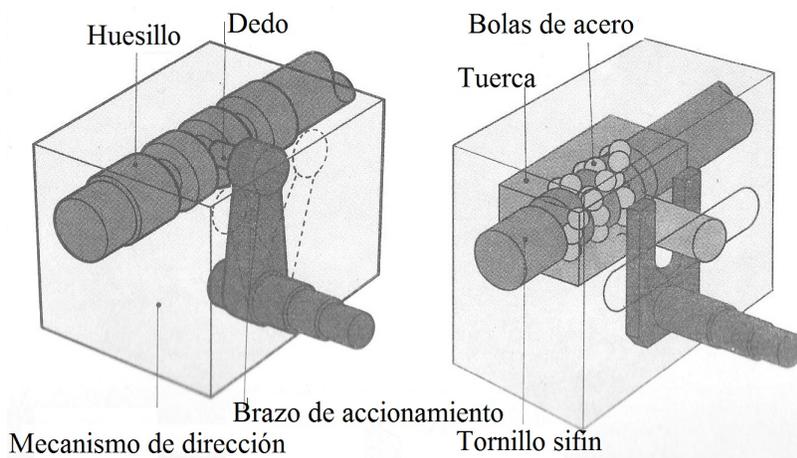


Figura 2.2: Dirección por dedo-huesillo (Izquierda), tornillo sinfín-tuerca (Derecha) (tomado de [38]).

vez que el auto ha salido de una curva. Debido al peso del automóvil, un conductor no tendría la fuerza necesaria para orientar las ruedas, por tanto es necesario un sistema que le permita aumentar o multiplicar la fuerza que se aplica en el volante y lograr así el viraje de las llantas. Ejemplos de mecanismos de multiplicación son el de dedo-huesillo y el de tornillo sinfín-tuerca, éstos se pueden apreciar en la figura 2.2 y son aplicados en sistemas de dirección como el que se muestra en la figura 2.3.

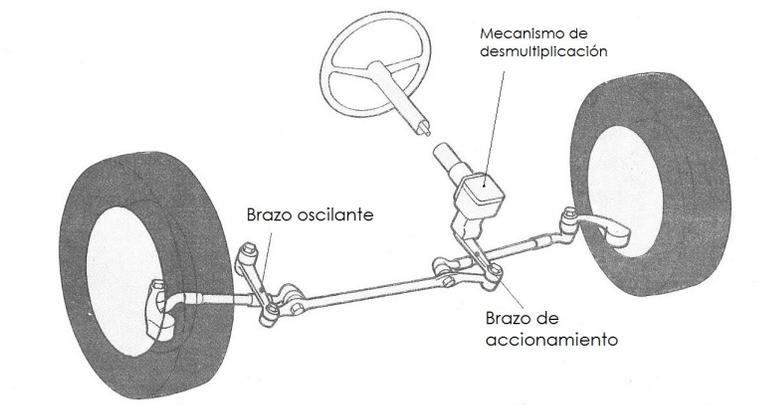


Figura 2.3: Sistema de dirección que aplica mecanismos de desmultiplicación tipo dedo-huesillo o tornillo sinfín-tuerca (tomado de [38]).

Existen diferentes tipos de sistemas de dirección pero estos comparten elementos esenciales los cuales se muestran en la figura 2.4.

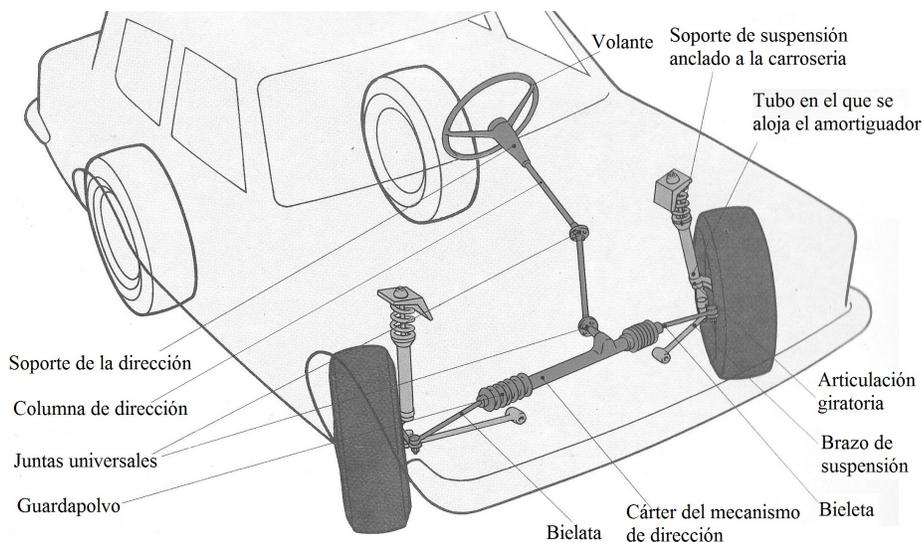


Figura 2.4: Sistema de dirección del automóvil (tomado de [38]).

### 2.1.1. Asistencia

Debido a los inconvenientes generados por los múltiples mecanismos, palancas y articulaciones presentes en los sistemas tornillo-sinfín y dedo-huesillo; los fabricantes de autos han incorporado mayormente el uso del sistema piñón-cremallera como el que se observa en la figura 2.5, técnicamente este mecanismo sigue siendo un dispositivo de multiplicación de par torsional aunque más sencillo que los anteriores, [6]. A pesar de que el sistema de dirección cuenta con

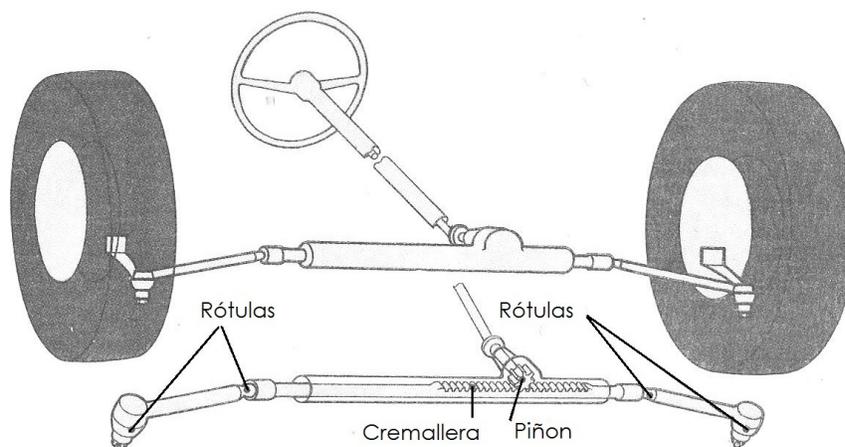


Figura 2.5: Mecanismo piñón-cremallera (tomado de [38]).

un mecanismo de multiplicación de fuerza, el conductor debe aún realizar un esfuerzo considerable al momento de maniobrar el vehículo, este esfuerzo es mayor cuando la velocidad es baja

o al estacionarse, [6]. Para disminuir el trabajo realizado por el conductor se ideó la llamada dirección asistida, la cual provee un par torsional de asistencia que se suma al par aplicado por el conductor, [39], produciendo una sensación de confort en la dirección del vehículo.

De acuerdo a Sulakhe, [1], las funciones del sistema de dirección asistida se pueden catalogar en dos tipos:

- ✓ Función primaria: Dar dirección
- ✓ Funciones secundarias: Reducir el esfuerzo del conductor, estabilidad al ir en línea recta, dar las condiciones adecuadas para la conducción, retorno del volante después de una curva y minimizar el desgaste de las llantas.

### 2.1.2. Dirección asistida hidráulica

La DAH (Dirección Asistida Hidráulica) o HPAS (Hydraulic Power Assist Steering por sus siglas en inglés) apareció de manera comercial por primera vez en los años 50's, [21] y [40] y los sistemas actuales aun conservan estas características. Un sistema de dirección asistida hidráulica típico es como el que se observa en la figura 2.6.

En este sistema se tiene un válvula rotativa entre el volante y el piñón-cremallera, es decir, en

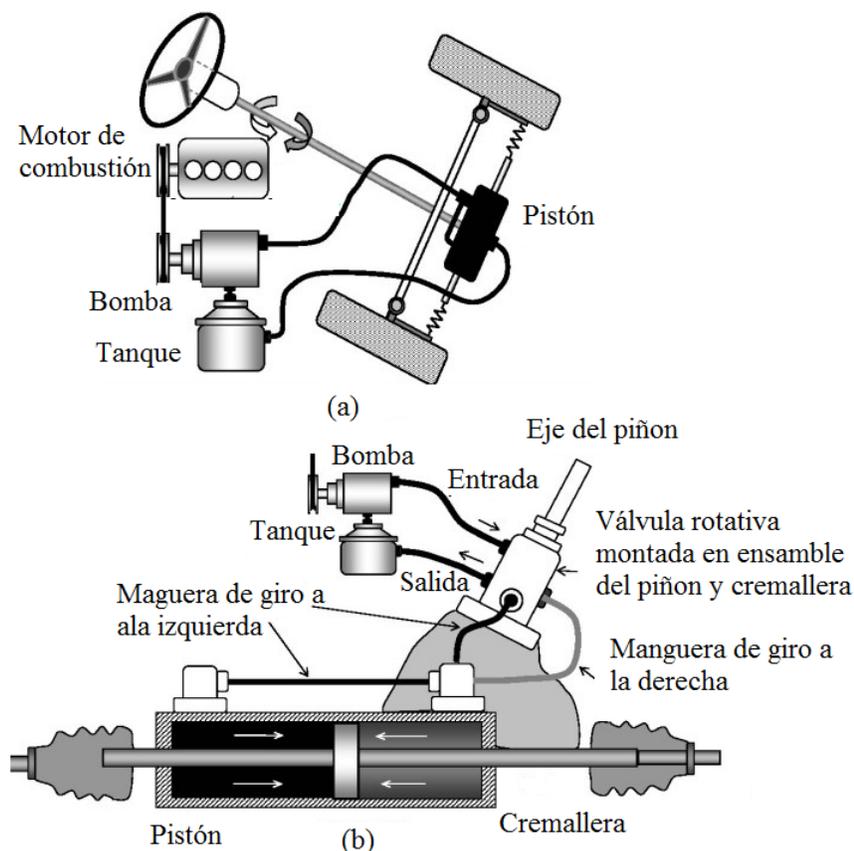


Figura 2.6: Sistema de dirección asistida hidráulica (tomado de [4]).

la columna de dirección. Esta válvula es el elemento de control del sistema, el desplazamiento de la válvula modula la presión en el pistón y por tanto el par de asistencia, [3]. Cabe mencionar que en el interior de la válvula existe una barra de torsión la cual tiene dos funciones. En primer lugar la barra regula el desplazamiento de la válvula de acuerdo al par que el usuario aplique en el volante, y finalmente es esta barra la que ofrece al conductor cierta sensación de resistencia en el volante y sin la cual el sistema se haría inestable.

Uno de los principales problemas de los sistemas de dirección asistida hidráulica es el hecho de que la bomba del sistema hidráulico se encuentra directamente conectada al motor de combustión interna del vehículo para que funcione y por tanto toma potencia del mismo. La bomba hidráulica está activa continuamente se use o no el sistema de dirección. Esto se ve traducido como gasto innecesario de energía.

Según [21], un sistema de dirección pasa entre el 80 % y 90 % del tiempo sin usarse, es decir sin moverse el volante, esto representa grandes pérdidas de energía. El sistema de dirección hidráulica representa el 3 % de consumo de energía del automóvil, este consumo se divide de la siguiente manera:

- ✓ 0.1 % Carga de trabajo.
- ✓ 0.2 % Pérdida de eficiencia de la bomba.
- ✓ 0.3 % Sobreflujo de la válvula de control.
- ✓ 0.5 % Pérdida de eficiencia por la banda de la bomba.
- ✓ 0.5 % Peso del sistema.
- ✓ 1.4 % Sobreflujo de la bomba.

Aunque Rahman en [4] menciona que las DAH pueden llegar a tomar del motor de combustión hasta un 15 % de energía en los autos pequeños y 10 % en los autos grandes. De cualquier manera las DAH tienen grandes pérdidas de energía. Además, el sistema hace uso de aceite hidráulico y por tanto es propenso a fugas, dejando de lado la pérdida de presión debido a esto, es una fuente de contaminación.

### 2.1.3. Dirección asistida eléctrica

Debido a los múltiples problemas que presenta las direcciones asistidas hidráulicas se ha desarrollado una nueva tecnología que son las DAE (Dirección Asistida Eléctrica), EPS(Electric Power Steering) o EPAS(Electric Power Assisted Steering por sus siglas en inglés). La primera DAE fue utilizada en vehículos pequeños en 1988, [21]. Una DAE emplea un motor eléctrico para asistir al conductor mediante el uso de sensores y un sistema de transmisión mecánica. Todas las DAE funcionan bajo un principio básico de asistencia: **El par de asistencia varía de manera significativa debido a la velocidad del automóvil, a mayor velocidad menor asistencia y a menor velocidad mayor asistencia**, [1]. Este principio se prueba en [23] en un sistema con dirección asistida, a mayor velocidad el par que el conductor debe aplicar es mayor (existe poco par de asistencia) y al bajar la velocidad sucede lo contrario (existe mayor

par de asistencia). Aparte del par de asistencia, algunas DAE cuentan con asistencia al retorno del volante; este consiste en reintegrar el volante a la posición central después de salir de una curva; esto es conocido como retorno activo. El par aplicado en el retorno activo es mucho menor al par de asistencia, [5] y [23], el funcionamiento del principio activo se resume en la figura 2.7.

Una DAE, según Moriyama [31], debe ser flexible, es decir debe poder cambiar la fuerza de asistencia dependiendo de las condiciones externas, a manera de mejorar la sensación en la conducción, y esta última depende del reductor usado entre el motor y la columna de dirección, del control del motor de CD para compensar la inercia y fricción y de el mecanismo piñón-cremallera.

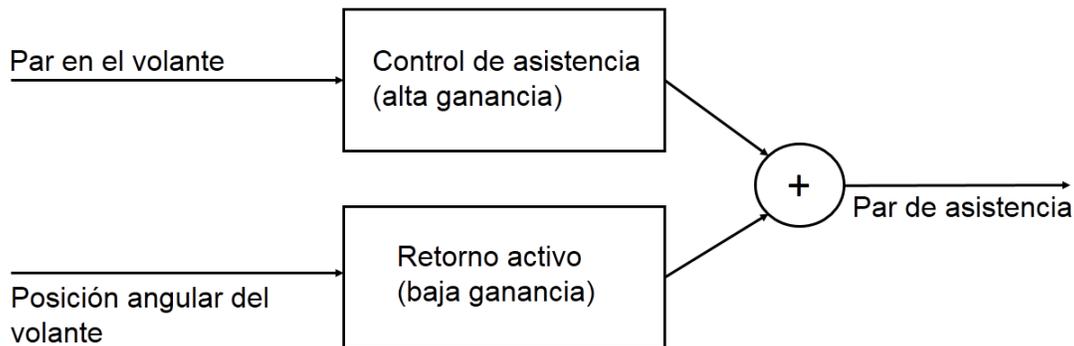


Figura 2.7: Retorno activo y par de asistencia (tomado de [5]).

### Ventajas y desventajas

Estos sistemas poseen diversas ventajas sobre los DAH, dentro de las que se encuentran: ahorro de espacio, menor peso, sin residuos contaminantes y la más importante, ahorro de energía. A diferencia de los sistemas DAH, que utilizan aditamentos como bombas, mangueras, tanque de almacenamiento de fluido y entre otros más, los sistemas DAE son bastante más compactos permitiendo ahorrar espacio dentro del automóvil. Una DAE no usa aceite hidráulico por lo que este agente contaminante es eliminado del sistema de dirección, por tanto este sistema contrarresta los problemas de contaminación de los automóviles. El ahorro de energía es debido a que el EPS es independiente del motor de combustión interna, ya que este toma la energía de la batería del automóvil, [5]. Este sistema de asistencia solo se activa cuando se gira el volante, es decir, solo toma energía de la batería cuando es necesario, [41], ya que en los sistemas de dirección hidráulicos la bomba esta en funcionamiento constante debido a que el fluido debe mantenerse bajo presión. Todo esto se ve traducido en ahorro de combustible y por ende menor contaminación. A pesar de estas ventajas el sistema DAH sigue siendo ampliamente utilizado en automóviles, sin embargo Hiroyuki en 2008, [21], pronosticó que en el año 2010 un 40 % del mercado automotriz estaría ofreciendo direcciones asistidas eléctricas.

El ahorro en combustible con una dirección asistida eléctrica puede variar dependiendo del vehículo y el tamaño del motor, pero normalmente se encuentra entre 1 a 3 millas por galón, [4] y [40]. En la figura 2.8 se muestra una gráfica comparativa entre los DAH y las DAE. Este estudio se realizó en dos vehículos de motor grande en el cual se probaron los dos tipos de

dirección. Las pruebas fueron hechas bajo el estándar de pruebas de manejo para la medición de emisiones y consumo de combustible llamado ECE15. Este estándar indica que el automóvil debe conducirse durante 200 segundos a las velocidades y tiempos indicados en la figura 2.9, [42] y [43] . Para realizar esta prueba, se deben procurar las siguientes condiciones: el automóvil debe estar apagado durante 6 horas antes de iniciar las pruebas, la temperatura ambiente debe estar entre 20°C y 30°C y el motor debe estar en ralentí al menos por 40 segundos antes de iniciar las pruebas. Como se observa en los resultados, un automóvil con un motor de 1.3L y un DAE tiene mayor gasto de combustible que uno de 1.6L y una DAE.

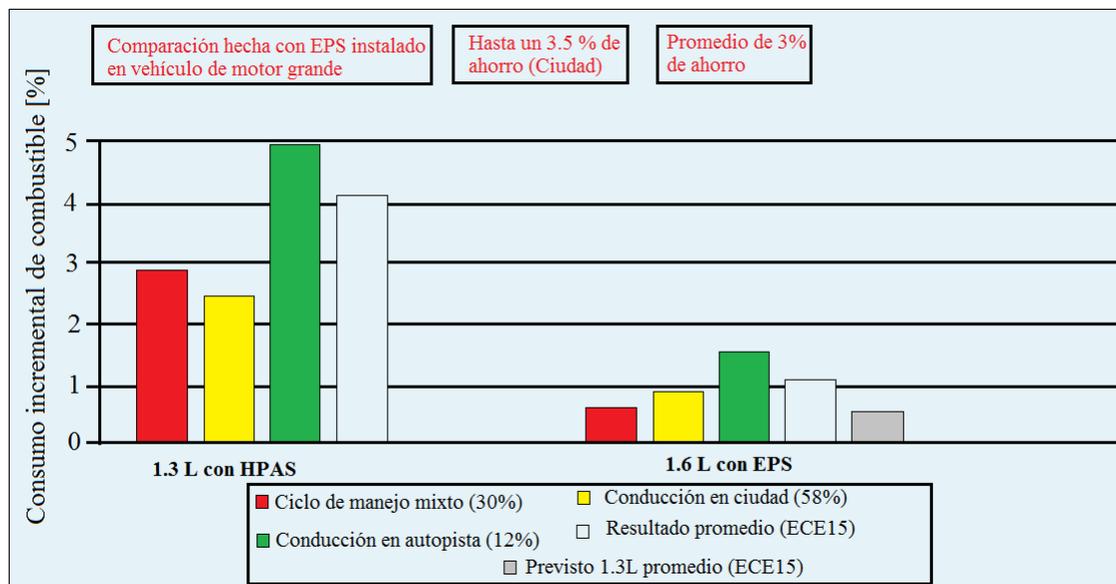


Figura 2.8: Gráfica comparativa entre las DAE y DHA (tomado de [5]).

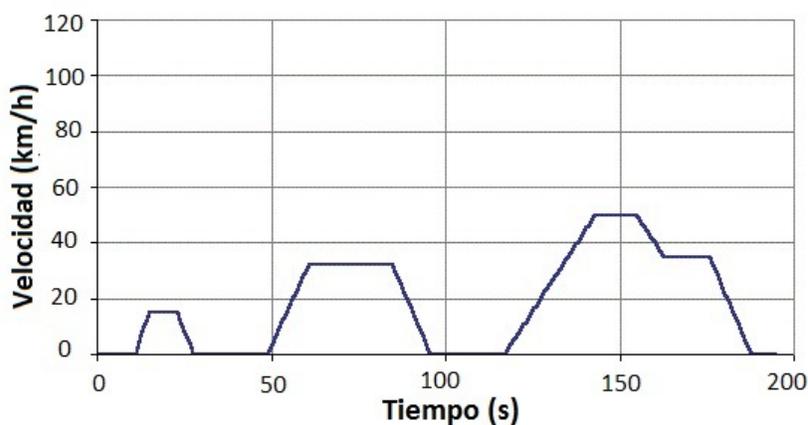


Figura 2.9: Velocidades para el ciclo de conducción ECE15 (tomado de [42]).

De acuerdo a Yoshida y Rajiw, [1], [44], algunas otras ventajas de un sistema DAE son:

- Mayor manejabilidad.

- Programación y calibración rápida, dependiendo de los parámetros del automóvil: peso, tamaño de llantas y nivel de asistencia deseado.
- Menor ruido.
- Manufactura y montaje sencillo.

Las DAE presentan también ciertas desventajas, por ejemplo en [6] se menciona que el principal inconveniente de las DAE es que en el momento de sufrir un fallo la dirección de automóvil se torna dura, debido a que el sistema se deshabilita, aunque esto no hace imposible su maniobrabilidad. Este tipo de sistemas solo puede ser instalado en vehículos pequeños ya que la fuerza de asistencia está limitada por el motor eléctrico y de colocar un motor mayor podría provocar una sobrecarga del sistema eléctrico. Los componentes de este sistema son sensibles a golpes. Las DAE están pensadas para conducción en ciudad y no para caminos accidentados. Miyazaki menciona en [21] que cuando se requieren especificaciones de alta potencial la DAE no puede ser instalado ya que su máxima salida está limitada por la resistencia de su estructura mecánica por tanto no puede cubrir toda la gama actual de una DAH.

### Clasificación de las DAE

Las DAE pueden clasificarse de acuerdo a su tipo de montaje, (Veáse [45], [40],[1] y [46] )

- **Columna:** La asistencia se aplica sobre la columna de dirección y generalmente por un mecanismo de tonillo sinfín y corona, aunque también algunos hacen uso de engranes.
- **Piñón:** La asistencia se hace directamente en el piñón que engrana con la cremallera.
- **Cremallera:** Este hace uso de un sistema de bolas recirculantes movidas por un motor eléctrico y estas convierten el movimiento giratorio en un movimiento lineal que es transmitido a la cremallera.
- **Doble piñón:** El motor eléctrico aplica la asistencia mediante un piñón extra sobre la cremallera.

Esta clasificación es ilustrada en la figura 2.10. Algunos autores como en [5] y [46] consideran una sola clasificación para los de tipo piñón.

La elección de algún tipo particular de DAE se basa principalmente en la fuerza de asistencia que se requiere y del espacio con que se cuenta para su instalación, [46].

Se muestran algunas característica de los tipos de DAE:

- El DAE de tipo columna (C-DAE) es el de menor costo debido a que no tiene que ser a prueba de agua y soportar altas temperaturas ya que se encuentra debajo del habitáculo (justo después del volante) de la carrocería, lo cual lo protege, [6] y [46]. Otra característica muy importante con la que cuenta el C-DAE es que tiene la capacidad de absorber las irregularidades del camino, ya que entre el sistema DAE y el mecanismo piñón cremallera existe un eje que se retrae haciendo que el usuario no perciba ningún movimiento abrupto en el volante.

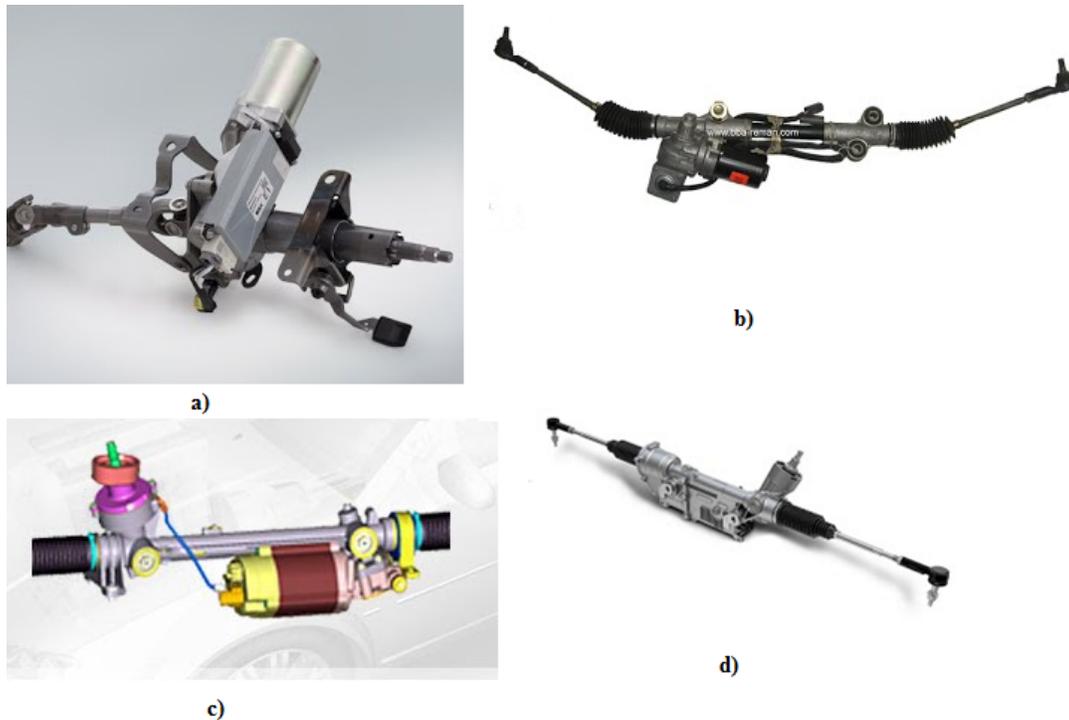


Figura 2.10: Clasificaciones de las DAE: a) Tipo columna, b) Tipo piñón, c) Doble piñón y d) Tipo cremallera (imagen tomada de [45]).

- El tipo piñón y doble piñón son un poco más caros ya que estos al estar abajo (sobre la cremallera y cerca del suelo) se encuentran expuestos a mayores temperaturas y suciedad, por lo tanto deben ser resistentes. Estos no absorben las irregularidades del camino, [46].
- El de asistencia de tipo cremallera es el más caro, suele usarse solo en vehículos de gama alta, aunque este sistema es el más eficiente, ya que al hacer uso de las bolas recirculantes se reduce la fricción en gran medida, pero surge la necesidad de aumentar el diámetro de la carcasa que envuelve a la cremallera, [45].

### Elementos de una DAE

De acuerdo con [5], [1] y [44] todas las direcciones asistidas eléctricas cuentan y hacen uso de los siguientes elementos:

- Motor eléctrico.
- Acoplamiento entre el motor y el mecanismo de dirección.
- Señal de la velocidad del vehículo.
- Señal del régimen del motor de combustión interna.
- Sensor de par torsional.
- UCE (Unidad de Control Eléctrica) ó ECU (Electric Control Unit, por sus siglas en inglés).



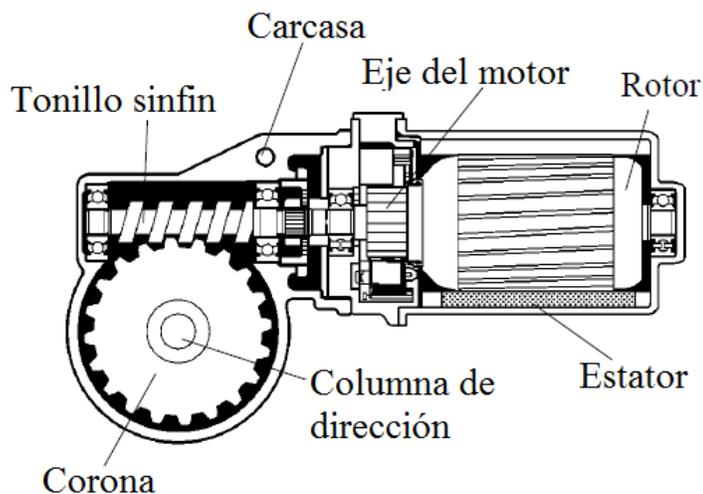


Figura 2.12: Mecanismo tornillo sinfín-corona (tomado de [40]).

**Señal de velocidad del vehículo** La velocidad del vehículo influye en la cantidad de resistencia generada por los neumáticos y por lo tanto, la DAE no debe ofrecer el mismo par de asistencia siempre. Un modelo de la dirección del vehículo propuesto por Hyung Lee en [23], indica que la fuerza ejercida en los neumáticos está dada por la ecuación (2.1). El diagrama de la dirección del vehículo puede observarse en la figura 2.13.

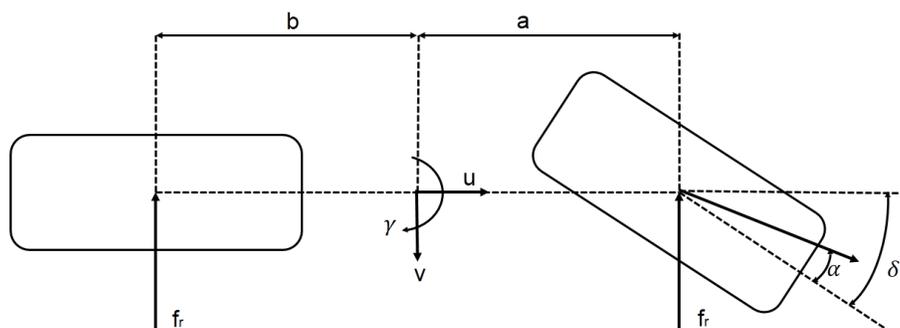


Figura 2.13: Diagrama de la dirección del automóvil (tomado de [23]).

$$F_f = C_f \cdot \alpha \quad (2.1)$$

$$\alpha = \delta - \frac{v + a \cdot \gamma}{u} \quad (2.2)$$

Donde:

$C_f$  = Rigidez en ángulo de los neumáticos(N/rad).<sup>1</sup>

$F_f$  = Fuerza lateral de las llantas(N).

$\delta$  = ángulo de giro de las ruedas(rad).

<sup>1</sup>La rigidez en ángulo es la relación entre el la fuerza lateral y el ángulo de viraje de la llanta, veáse [47]



aunque por otro lado resultan más caros. Un sensor de no contacto de tipo magnetorresistivos se muestra en la figura 2.14. Este sensor consta de tres anillos de detección dentados, fabricados de un material ferromagnético, dos bobinas, una de detección y otra para compensación de temperatura y un barra de torsión. Los anillos de detección 2 y 3 se encuentran fijos al eje de entrada, mientras que el anillo de detección 1 se encuentra fijo al eje de salida. Los anillos 1 y 2 tienen dientes cuyas caras se hayan encontradas y con cierta separación entre ellas. Una barra de torsión une los ejes de entrada y salida. Cuando el par aplicado en el eje de entrada es cero los dientes de los anillos 1 y 2 se encuentran en fase. Al momento de que se aplica un par, la barra se tuerce lo cual cambia las áreas del entrehierro de los anillos. Esto hace que el flujo magnético total del circuito magnético en la bobina de detección crezca o decrezca y la impedancia de dicha bobina cambia traduciéndose en una medición del par de torsión sobre la columna de dirección. El anillo 3 es utilizado para contrarrestar los errores que podría causar la temperatura ambiental en la medición del par, ya que detectando la diferencia de potencial que existe entre entre la bobina de detección y la de compensación de temperatura esta señal puede obtenerse sin influencia de temperatura. Una descripción más detallada de la construcción y funcionamiento de este sensor puede consultarse en [48]. Un diagrama eléctrico del sensor de par puede observarse en la figura 2.15.

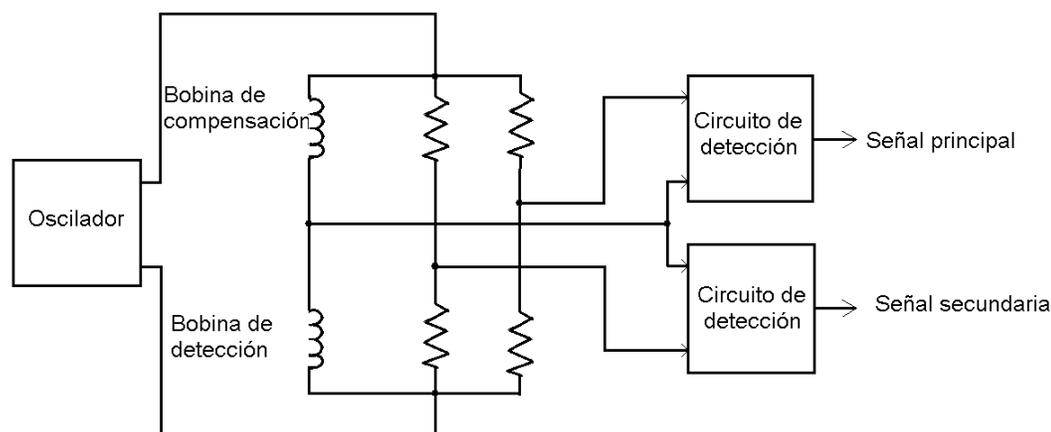


Figura 2.15: Diagrama eléctrico del sensor de par torsional de no contacto de la empresa Koyo Seiko Corporation (tomado de [49])

**Unidad de control eléctrica (UCE) o ECU (Electric Control Unit)** La unidad de control es la parte principal del sistema, ya que ésta es la encargada de elegir la cantidad de asistencia que el motor debe entregar. Esta unidad recibe las señales de velocidad del vehículo, de régimen del motor de combustión y del sensor de torque; con esta información y mediante el empleo de tablas ó gráficas determina la asistencia a aplicar. En realidad un UCE cuenta con al menos 8 curvas almacenadas, pero solo una es activada en el momento, la elección de la curva se lleva a cabo por la información que recibe del MCC (Módulo de Control de Carrocería) o BCM (Body Control Module por sus siglas en inglés) el cual contiene el estado del vehículo, véase [40].

Una vez que se ha elegido el par a aplicar, un submódulo de la DAE se encarga de controlar el motor para que este desarrolle el par requerido. Esto se hace controlando la corriente en el

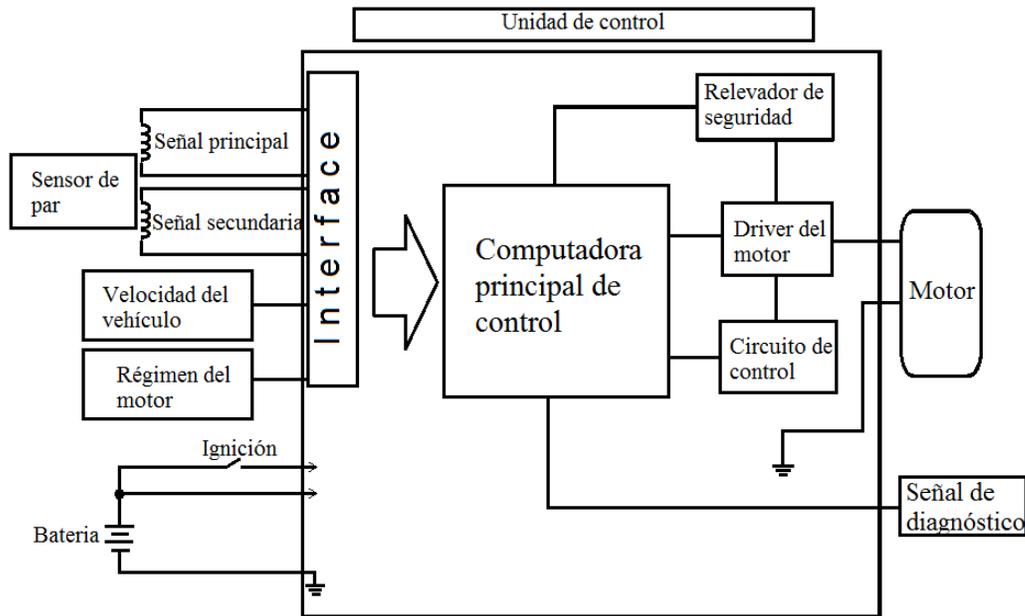


Figura 2.16: Diagrama a bloques de una DAE (tomada de [50]) .

motor eléctrico y generalmente para ello el UCE utiliza una señal PWM. El diagrama a bloques de una DAE es mostrado en la figura 2.16 y un ejemplo de las curvas de asistencia aplicadas puede observarse en la figura 2.17.

### Par de asistencia y curvas características

De acuerdo a Qung,[51], existen tres tipos típicos de curvas: de línea recta, línea quebrada y línea curva. Sin importar el tipo, una curva de asistencia puede ser dividida en tres intervalos: intervalo de no asistencia, fijo y cambiante, dichas curvas se muestran en la figura 2.18. Estas curvas están diseñadas bajo los siguientes principios:

- Si el par torsional en el volante aumenta entonces la corriente en el motor aumenta de acuerdo con las reglas vigentes.
- Si la velocidad del volante aumenta, la velocidad del motor también lo hace.
- Si el giro del volante se invierte, el motor debe tener poco retraso al hacerlo.
- Cuando el vehículo va rápido, el par de asistencia se disminuye de acuerdo a las reglas vigentes.

A partir de un análisis dinámico de la dirección de un automóvil Ciarla y colaboradores en [52], proponen una ecuación que describe el par de asistencia, la cual se muestra a continuación.

$$U = \frac{T_a}{N_1} - \delta \left( \frac{T_a}{N_1} \right)^n \quad (2.3)$$

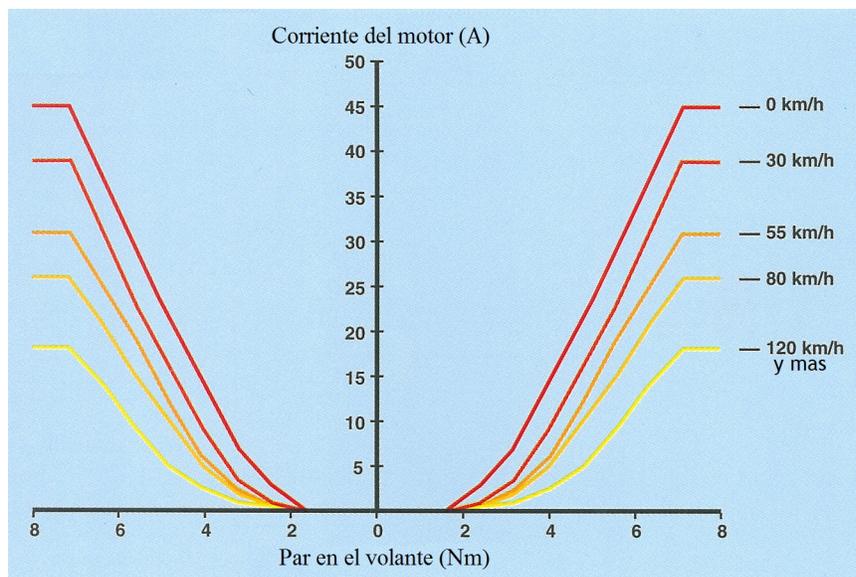


Figura 2.17: Curvas de asistencia empleada por la UCE (tomada de [50]).

Donde:

$T_a$  = Par en la cremallera debido a las llantas.

$N_1$  = Relación de reducción entre el piñón y la cremallera.

$\delta$  = Magnitud de la intensidad del par de fricción.

$n$  = Taza de crecimiento de la sensación de estímulo del usuario.

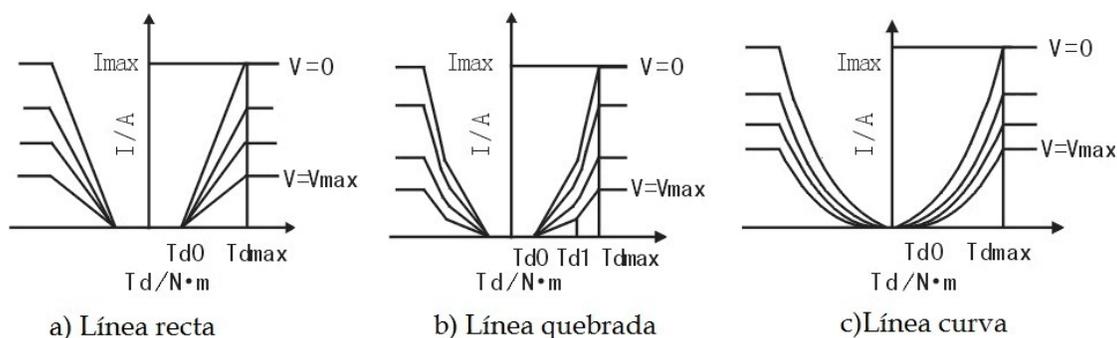


Figura 2.18: Tipos de curvas de asistencia (tomada de [51]).

Las variables  $\delta$  y  $n$  se sintonizan de acuerdo a la ley de Steven, la cual establece una relación cuantitativa entre la magnitud de un estímulo físico y su intensidad en una persona, véase [53]. La UCE tiene algunas funciones paralelas, como es, enviar señales de error, proteger el motor y evitar el sobrecalentamiento del mismo circuito. De existir algún error como incongruencia entre las señales de velocidad del vehículo y régimen del motor, bajo voltaje en la batería, sobrecalentamiento del motor o del circuito, el sistema reducirá la asistencia o en su defecto la desactivará totalmente, si sucede lo último, la dirección del automóvil se tornará dura, esto por el mecanismo reductor del motor eléctrico, pero no perderá la movilidad. Como se mencionó, algunos sistemas constan de un clutch para desacoplar este mecanismo de la columna de di-

rección, entonces la UCE desacoplará el mecanismo de la columna de dirección al momento de desactivar la asistencia.

# Capítulo 3

## Diseño y construcción de la plataforma

En este capítulo, se presenta el diseño de la estructura de soporte del sistema DAE, que busca brindar una estabilidad y resistencia mecánica adecuada a la estructura, el ahorro de espacio y facilidad de transportación y la capacidad de ejercer fuerzas de carga en el sistema de dirección. Se expone el diseño del mecanismo de emulación de las fuerzas de carga en la plataforma, el cual utiliza resortes de extensión para la obtención de estas fuerzas. Además, se realiza un análisis de esfuerzos del cordón de soldadura utilizado en la sujeción de los resortes para procurar su resistencia y viabilidad.

### 3.1. Selección y caracterización de los resortes

Como se mencionó antes, la fuerza de carga es transmitida desde las llantas hasta la columna de dirección mediante el mecanismo piñón-cremallera, dicha fuerza es mayor cuanto más baja sea la velocidad del automóvil. Tomando como base el estudio experimental realizado por Tuquinga y Mejía en [6], un valor aproximado de la fuerza de carga ejercida por los neumáticos en el sistema de dirección cuando el automóvil se encuentra estacionado es de 1,626.8 N. Es entonces necesario diseñar un mecanismo que ejerza sobre la DAE una fuerza de carga que se encuentre en este rango.

Un elemento mecánico que puede realizar esta acción y que es fácil de implementar, es un resorte de extensión. Este resorte debe generar la fuerza de 1,626.8 N y resistir las condiciones de operación para evitar así alguna falla por fatiga.



Figura 3.1: Mecanismo de piñón-cremallera de Tsuru.

El mecanismo piñón-cremallera con el que se cuenta es el de un automóvil marca Tsuru como el mostrado en la figura 3.1 y para el cual fue necesario adaptar los resortes. Dicho mecanismo tiene la capacidad de desplazarse de manera longitudinal un total de 15 cm y por tanto, considerando que el desplazamiento siempre será desde el punto medio del mismo, se puede decir que la elongación total para los resortes es de 7.5 cm y que con dicha deformación este debe ofrecer una fuerza aproximada de 1,626.8 N.

A partir de las condiciones anteriores, se propusieron dos mecanismos para adaptar los resortes a la cremallera, los cuales se muestran en la figura 3.2. La opción a) muestra un diseño sencillo, ya que solo consta de un elemento perpendicular unido a la cremallera y por lo tanto su manufactura es simple. La opción b) es un diseño más elaborado debido a los dobleces del elemento acoplado a la cremallera. Por otro lado esta última opción permite ahorrar espacio procurando así una plataforma de menor tamaño; debido a esto ha sido elegido.

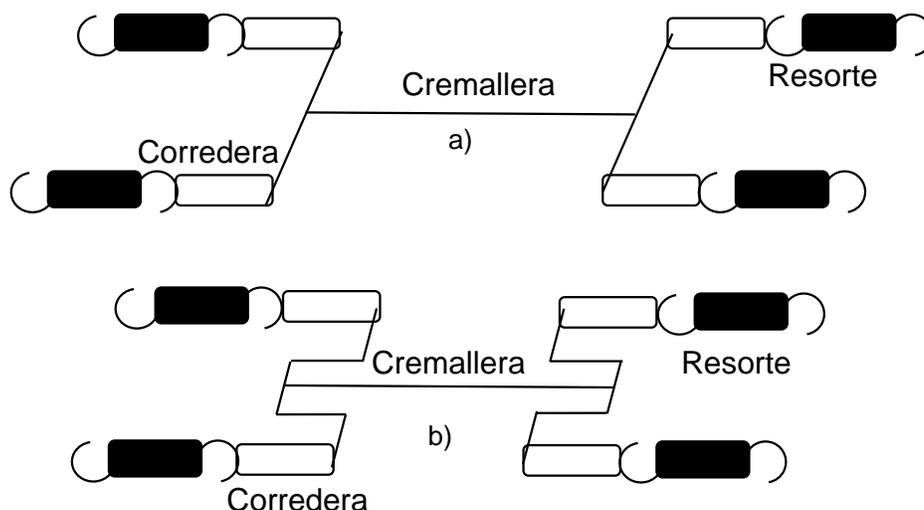


Figura 3.2: Mecanismos propuestos para aplicar carga al sistema DAE.

Como se puede observar, este mecanismo hace uso de dos resortes por cada lado, por tanto la fuerza total que deberá ejercer cada resorte es de 813.4 N. Habiendo considerado esto, los requerimientos para el resorte son:

- Fuerza en extensión máxima de 813.4N
- Deformación máxima de 7.5 cm

Una vez obtenidos los requerimientos, se diseñan los resortes siguiendo el método descrito por Robert L. Mott en [54]. Se propone entonces un diámetro exterior del resorte ( $D_E$ ) de 39 mm, se tiene como dato una fuerza ( $F_o$ ) de 813.4 N y una deformación ( $\Delta_L$ ) de 75 mm, se propone un factor de Wahl ( $k$ ) de 1.2 y un esfuerzo de diseño ( $\tau_d$ ) de 700MPa. Consultando la tabla A.1 del Apéndice A, se observa que el acero ASTM A228 es un material comúnmente utilizado para la fabricación de resortes. Además, se propone también un diámetro medio ( $D_m$ ) de 35 mm y finalmente un factor de servicio promedio.

### 3.1.1. Cálculo de parámetros del resorte

Primero se calcula el grosor del alambre aplicando la siguiente ecuación

$$D_w = \left[ \frac{8kF_oD_m}{\pi\tau_d} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

donde  $D_w$  es el diámetro del alambre del resorte. Sustituyendo los valores en la ecuación (3.1) se obtiene

$$D_w = \left[ \frac{8(1.2)(813.4N)(0.035m)}{(\pi)(700Mpa)} \right]^{\frac{1}{3}} = 4.99mm.$$

Debido a que el valor de 4.99 mm no es estándar, se escoge un calibre de 5mm. Ahora se calcula el diámetro medio ( $D_m$ ) y el diámetro interno ( $D_I$ ) del resorte

$$D_m = D_E - D_w = 39mm - 5mm = 34mm$$

$$D_I = D_m - D_w = 29mm$$

Se obtiene nuevamente el esfuerzo de diseño utilizando la gráfica de esfuerzos cortantes para el diámetro de alambre de la figura A.1 del Apéndice A, siendo su nuevo valor  $\tau_d = 736.6MPa$ .

El índice C del resorte, el cual debe estar dentro del rango  $5 < C < 12$ , se determina con el diámetro medio del resorte y el diámetro del alambre:

$$C = \frac{D_m}{D_w} = 6.8 \quad (3.2)$$

Este parámetro permite corregir la constante de Wahl

$$k = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} = 1.219 \quad (3.3)$$

Con los datos anteriores se puede calcular el esfuerzo torsional de operación  $\tau_o$  aplicando la ecuación,

$$\tau_o = \frac{8kF_oD_m}{\pi D_w^3} = \frac{8(1.219)(813.4N)(0.034m)}{\pi(0.005m)^3} \quad (3.4)$$

$$\tau_o = 686.77Mpa$$

El factor de seguridad para este resorte está dado por:

$$n = \frac{\tau_d}{\tau_o} = 1.072 \quad (3.5)$$

Como se observa, éste es mayor a 1, por lo tanto el diseño es seguro. Lo siguiente es calcular la constante elástica  $K$  del resorte,

$$K = \frac{F_o}{\Delta_L} = \frac{813.4N}{0.075m} = 10.845 \frac{kN}{m}$$

El número de espiras activas del resorte,  $N_a$ , se determina sustituyendo el valor de la constante elástica en la ecuación (3.6). El módulo en cortante  $G$  se obtiene de la tabla A.2 del Apéndice A, el cual en este caso es de 81.7 GPa.

$$N_a = \frac{GD_w}{8KC^3} \quad (3.6)$$

$$N_a = \frac{(81.7Gpa)(0.005m)}{8(10.845\frac{kN}{m})(6.8)^3} = 14.97 \approx 15 \text{espiras}$$

Se calcula la longitud del cuerpo del resorte  $L_c$ , suponiendo extremos del resorte planos y que  $N$  es igual al número de espiras activas  $N_a$ .

$$L_c = ND_w = (15)(0.005m) = 0.075m$$

La longitud libre del resorte se puede obtener como:

$$L_f = L_c + 2D_I = (0.075m) + 2(0.029) = 0.133m$$

Ahora se calcula la deflexión desde la longitud libre hasta la longitud de operación  $f_o$ :

$$f_o = L_o - L_f = 0.205m - 0.133m = 0.075m$$

Conociendo el valor de  $f_o$  es posible encontrar la tensión inicial del resorte, cuando este comienza a estirarse, a través de la siguiente ecuación

$$F_I = F_o - Kf_o = 813.4 - 10.845\frac{kN}{m}(0.075) = 0N \quad (3.7)$$

Y el esfuerzo inicial aplicado esta dado por:

$$\tau_I = \frac{8kF_I D_m}{\pi D_w^3} = \frac{8(1.219)(0N)(0.034m)}{\pi(0.005m)^3} = 0\frac{N}{m} \quad (3.8)$$

Con esto se ha finalizado el proceso de diseño de los resortes, resumiendo las características del mismo se tiene:

- Alambre calibre 5
- Grosor  $D_w = 5mm$
- Diámetro medio  $D_m = 34mm$
- 15 espiras activas
- Longitud de cuerpo  $L_c = 75mm$
- Diámetro exterior  $D_E = 39mm$

## 3.2. Caracterización de los resortes

Con la información de la sección anterior, se realizó una búsqueda de resortes comerciales que tuvieran características similares. En el mercado automotriz se hallaron tres resortes candidatos, los cuales se muestran en la figura 3.3. Estos resortes fueron caracterizados con la máquina de ensayos Shimadzu Autograph AGS-J Series que se muestra en la figura 3.4. Básicamente, se colocó el resorte a probar en posición de reposo sujetándolo con las dos mordazas. A partir de dicha posición, se aplicaron incrementos en la fuerza y se registraron los desplazamientos, en milímetros. Los resultados de estos experimentos se muestran en el Apéndice C y

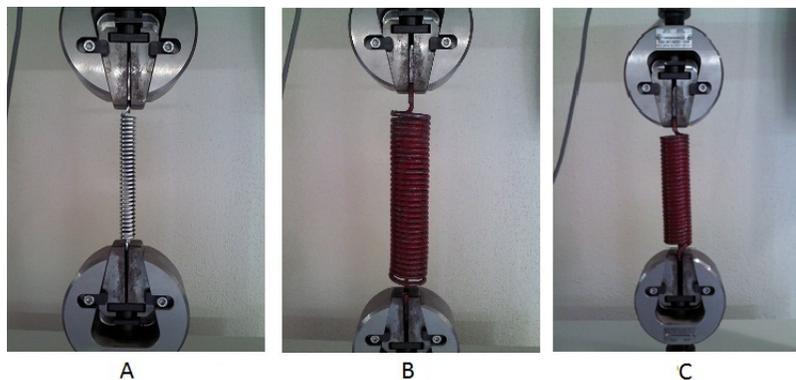


Figura 3.3: Resortes propuestos.



Figura 3.4: Máquina de ensayos Shimadzu Autograph AGS-J Series.

las dimensiones de los tres resortes se resumen en la Tabla 3.1. Como se puede observar en las tablas C.1, C.2 y C.3 del Apéndice C, el resorte A a una deformación de  $88.86\text{mm}$  ejerce una fuerza en sus extremos de fuerza de  $680\text{N}$ . Dado que la deformación máxima que se requiere es de  $75\text{mm}$  y una fuerza de al menos  $813.4\text{N}$ , este resorte quedó descartado, además, después de la prueba el resorte sufrió deformación permanente. El resorte B a una deformación de  $119.68\text{mm}$  generó una fuerza en tensión de  $560\text{N}$ , por lo que también se descartó. Finalmente, el resorte C mostró deformaciones y fuerzas más cercanas a lo requerido. Se procedió entonces a ajustar una curva con el programa Matlab<sup>®</sup> para modelar la elongación del resorte C a partir de los datos obtenidos. Se obtuvo el modelo lineal siguiente:

$$y = 7.7408x + 182.9259[N] \quad (3.9)$$

Tabla 3.1: Dimensiones de los resortes candidatos.

Resorte	Diámetro exterior( $D_E$ )	Longitud de cuerpo( $L_c$ )	Diámetro de alambre( $D_w$ )
A	16mm	80mm	2.8mm
B	41.5mm	157mm	4.8mm
C	36mm	142mm	5mm

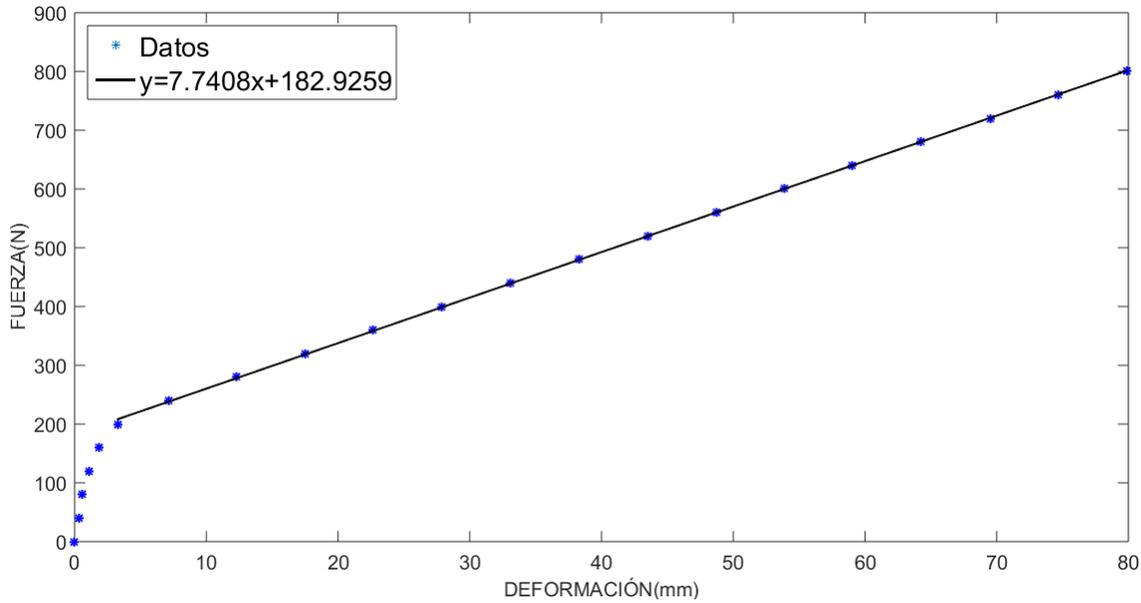


Figura 3.5: Gráfica de fuerza-deformación del resorte C.

Tabla 3.2: Características del resorte elegido.

Diámetro exterior	36 mm
Longitud de cuerpo	142 mm
Diámetro de alambre	5mm
Longitud libre	178mm

En la figura 3.5 se aprecia que este modelo omite los primeros cinco puntos de la gráfica de datos experimentales debido a que éstos no son representativos del comportamiento lineal del resorte dentro del rango de operación en que se pretende utilizarlo. Evaluando la ecuación (3.9) en  $75\text{mm}$  se obtiene una fuerza de  $763.4859\text{N}$ , el cual es un valor muy cercano a la fuerza requerida a esa deformación,  $813.4\text{N}$ . Este resorte es el más indicado para utilizarse en el sistema de emulación de resistencia de los neumáticos, sus características se resumen en la tabla 3.2.

### 3.3. Mecanismo de emulación de fuerza de los neumáticos

Con base en las características ya obtenidas del resorte a utilizar, fue posible dimensionar el mecanismo que simulará la fuerza de oposición de los neumáticos. Un diagrama de este mecanismo se muestra en la figura 3.6, para ello se tomó en cuenta el desplazamiento total, la longitud de la cremallera, la longitud libre del resorte y el diámetro exterior del mismo. Posteriormente, se diseñó la forma de sujeción del extremo libre del resorte, el cual debe permitir el movimiento del resorte y las fuerzas de carga. Por ello se propuso el método de sujeción que se muestra en la figura 3.7 a). Como se puede observar, una parte crítica de la estructura es el cordón de soldadura que existe entre el miembro estructural y la placa metálica, ya que en él recaerán los esfuerzos mayores. Por esta razón se optó por realizar un análisis de resistencia

del cordón de soldadura para verificar la seguridad del mismo. Se procuran dos análisis para el cordón de soldadura: en tensión y flexión.

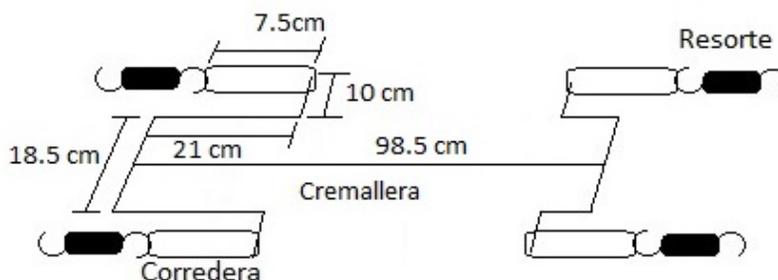


Figura 3.6: Dimesiones del mecanismo.

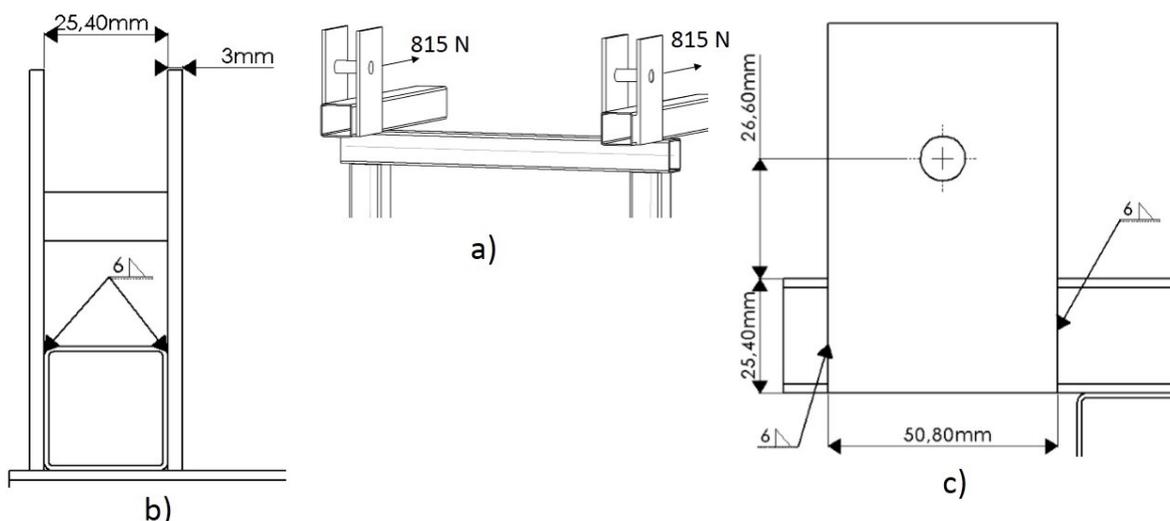


Figura 3.7: Diagrama del mecanismo de sujeción de los resortes .

### 3.3.1. Análisis del cordón de soldadura

Este análisis se enfocará en hallar las dos fuerzas, un par de torsión  $M$  y un cortante  $V$  y los esfuerzos que estos generan sobre el cordón de soldadura, estos dos causados por la fuerza de reacción del resorte. Una vez hallado los esfuerzos se comparará con la resistencia que puede ofrecer el material del cual esta hecho el electrodo. Observando la figura 3.7 b) y c) para el análisis en tensión, se puede suponer que el cordón tiene una geometría tal como la que se muestra en la figura 3.8. Si se toman en cuenta los perfiles geométricos mostrados en la figura B.2 del Apéndice B, el área transversal total de la garganta del cordón de soldadura está dado por la ecuación siguiente

$$A = 0.707h(2b + d) = 430.9872mm^2 \tag{3.10}$$

Y su momento polar unitario es

$$J_U = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d} = 50,526.7806mm^3 \tag{3.11}$$

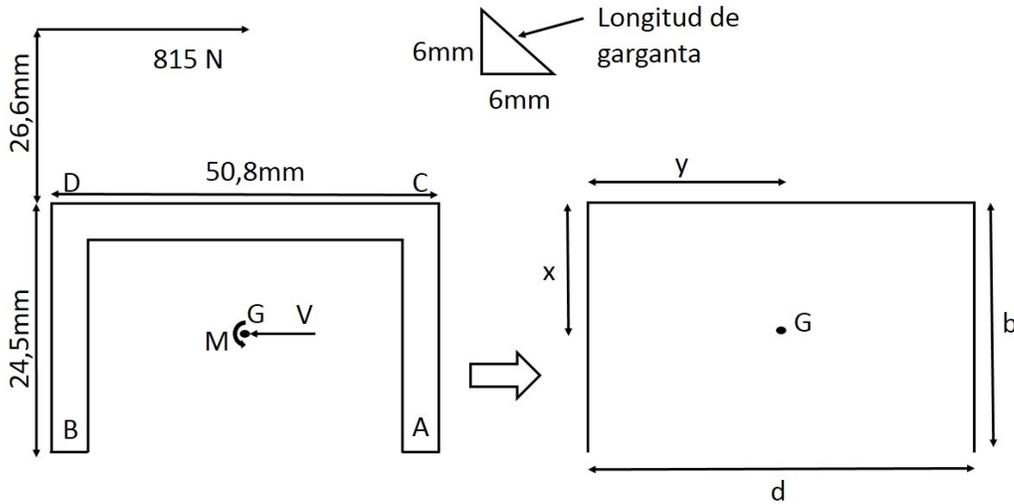


Figura 3.8: Forma geométrica del cordón de soldadura.

La ubicación  $(x, y)$  del punto G es calculada mediante las ecuaciones siguientes:

$$x = \frac{b^2}{2b + d} = 6.35mm \quad (3.12)$$

$$y = \frac{d}{2} = 25.4mm \quad (3.13)$$

Debido a que se trata de dos cordones por unión, la fuerza cortante  $V$  es

$$V = \frac{815N}{2} = 407.5N$$

Mientras que el par de torsión  $M$  se obtiene aplicando la siguiente ecuación

$$M = 407.5N(26.6mm + x) = 13.427Nm$$

El esfuerzo cortante primario  $\tau'$  está dado por:

$$\tau' = \frac{V}{A} = 945.5037kPa$$

Enseguida se calcula la distancia que existe entre el punto G y los puntos, A, B, C y D de la figura 3.8 tal como sigue:

$$r_A = r_B = \sqrt{(b - x)^2 + (y)^2} = 31.75mm$$

$$r_C = r_D = \sqrt{(x)^2 + (y)^2} = 26.1817mm$$

Como se observa, los puntos  $r_A$  y  $r_B$  están más distanciados del punto G y por lo tanto son los puntos más críticos del cordón de soldadura. Se determina entonces el esfuerzo en dichos puntos.

Primero se obtiene el momento polar de inercia  $J$  como se muestra en la ecuación (3.14), donde  $l_g$  es la longitud de garganta la cual es igual a  $h\cos 45^\circ$

$$J = J_U l_g = 214,366.9757mm^4 \quad (3.14)$$

El esfuerzo cortante secundario  $\tau_A''$  se obtiene mediante la ecuación

$$\tau_A'' = \frac{Mr_A}{J} = 1.9876MPa \quad (3.15)$$

Dicho esfuerzo es perpendicular a  $r_A$  tal como se muestra en la figura 3.9. El ángulo  $\theta$  mostrado

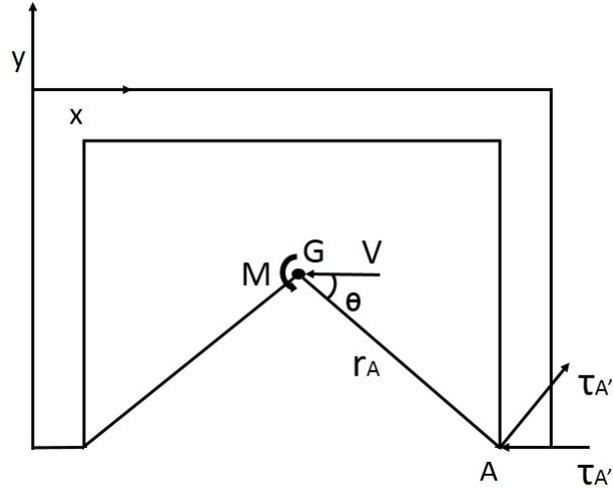


Figura 3.9: Esfuerzos en el punto A.

en esta figura puede ser obtenido de la siguiente manera:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{b-x}{y} \right) = 36.86^\circ$$

Conociendo este ángulo, es posible obtener las componentes  $x$  y  $y$  de  $\tau_A''$  tal como se muestra a continuación.

$$\tau_A x'' = \tau_A'' \sin \theta = 1.1922MPa$$

$$\tau_A y'' = \tau_A'' \cos \theta = 1.5902MPa$$

Conociendo estos valores podemos calcular el esfuerzo total en el punto A:

$$\tau_A = \sqrt{(\tau_A' - \tau_A x'')^2 + (\tau_A y'')^2} = 1.6092MPa$$

Debido a que se pretende utilizar un electrodo con código  $E6013$  y consultando la tabla B.3 del Apéndice B, sabemos que la resistencia a la fluencia  $S_y$  de dicho electrodo es de  $345MPa$ . Recurriendo a la teoría de cortante máximo obtenemos que  $\tau_{Sy} = 0.577S_y$ . Se aplica la ecuación (3.16), y se observa que el factor de seguridad es mayor a uno y por lo tanto el diseño propuesto para la sujeción de los resortes es adecuado.

$$\eta = \frac{\tau_{Sy}}{\tau_{max}} = \frac{\tau_{Sy}}{\tau_A} = 123.71 \quad (3.16)$$

Ahora se analiza el cordón de soldadura en flexión. De la figura 3.8 se calcula el momento de inercia unitario  $I_u$  y de acuerdo con la figura B.1 del Apéndice B, éste se puede obtener como

$$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2y + (b+2d)y^2 = 166,752.35mm^3 \quad (3.17)$$

Y por lo tanto el momento de inercia respecto al punto G es

$$I = 0.707hI_u = 707,363.4687mm^4 \quad (3.18)$$

Conociendo  $I$ , el esfuerzo normal  $\sigma$  se obtiene como sigue, donde  $C = d/2$

$$\sigma = \frac{MC}{I} = 482.1365kPa$$

Ahora se calcula el esfuerzo de Von Mises,  $\sigma_{vm}$ , como sigue:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 1.8467MPa$$

El factor de seguridad del cordón se calcula con la ecuación (3.19). Nótese que éste es mayor a uno por lo tanto el cordón es aceptado también en flexión

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{vm}} = 186.81 \quad (3.19)$$

Con esto se finaliza el análisis del cordón de soldadura que se pretende aplicar.

### 3.4. Estructura de soporte

A partir de las dimensiones del sistema piñón-cremallera de un automóvil Nissan<sup>®</sup> Tsuru, cuyo modelo CAD realizado en Solid Works<sup>®</sup> se muestra en la figura 3.10 a), y del mecanismo de emulación de fuerza diseñado en la sección anterior, se obtuvo la estructura final para el sistema de aplicación de carga a la DAE que se muestra en la figura 3.10 b).

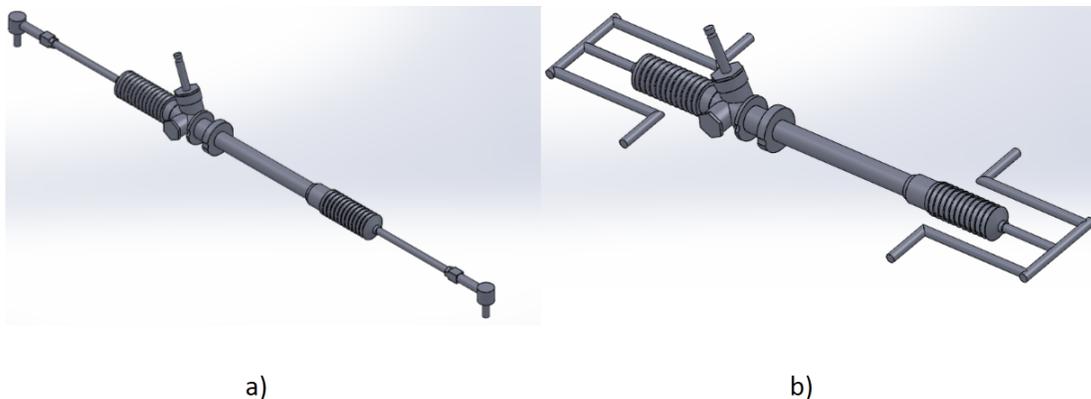


Figura 3.10: Diseño CAD del sistema piñón-cremallera (a), sistema piñón-cremallera modificada(b).

Una vez obtenido el modelo 3D de la cremallera modificada, se prosiguió al diseño CAD de lo que llamará la estructura inferior, figura 3.11, la cual soporta los resortes, la cremallera y el mecanismo de emulación de fuerza. El diseño contempla el uso de miembros estructurales cuadrados (PTR) de una pulgada y un grosor de 1mm. Esta estructura está pensada para que pueda ser acoplada a la estructura superior (la cual se presentará más adelante) mediante

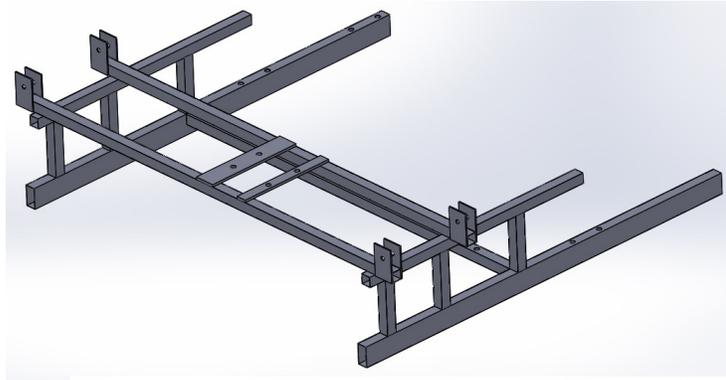


Figura 3.11: Diseño CAD de la estructura de soporte inferior.

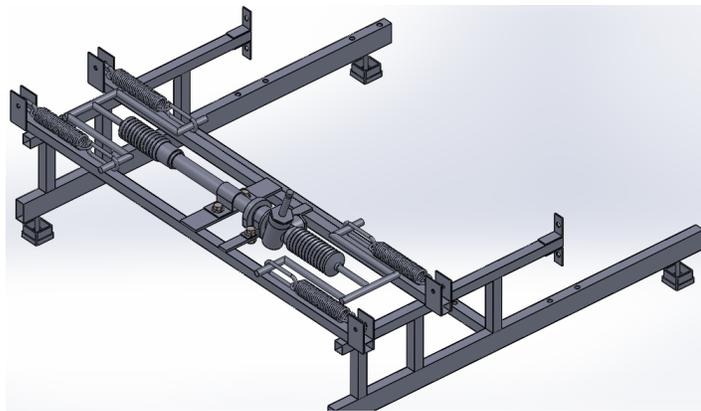


Figura 3.12: Ensamble de la estructura inferior.

tornillos y así proveer una plataforma desmontable y de fácil transporte. Una vez construido el modelo CAD de la estructura inferior, del sistema piñón-cremallera y del resorte a utilizar, se realizó un ensamble de todos estos componentes agregando un sistema de correderas y sujeción de los resortes, obteniéndose el resultado que se muestra en la figura 3.12. Como se puede observar en la figura 3.13, dicho ensamble consta de:

- Una sujeción libre en un extremo del resorte, otorgándole libertad de movimiento.
- Una guía de forma ovalada para el movimiento lineal de la cremallera, permitiendo un desplazamiento máximo de  $75mm$ , que es la elongación máxima requerida para los resortes.
- Un elemento que funciona a modo de corredera deslizándose dentro de la guía.
- Un par de abrazaderas para sujetar la cremallera a la estructura y permitir el movimiento en una sola dirección.

Una vez que el ensamble inferior se concluyó, el siguiente paso fue construir el modelo CAD del sistema DAE comercial, dicho modelo se puede observar en la figura 3.14. Un elemento importante para acoplar la DAE al sistema piñón-cremallera es la sección de la columna de dirección que cuenta con las juntas universales, comúnmente llamadas crucetas. Estas juntas permiten transmitir el movimiento y esfuerzo de giro del volante hacia el mecanismo de dirección

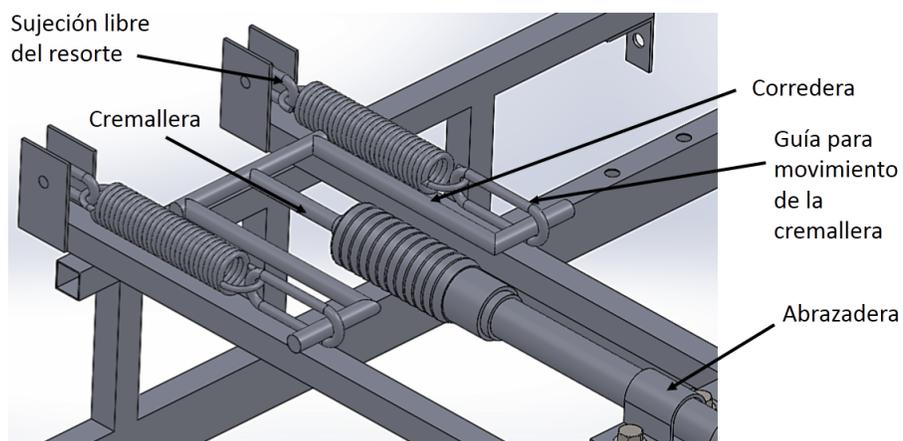


Figura 3.13: Detalle del ensamblaje de la estructura inferior.

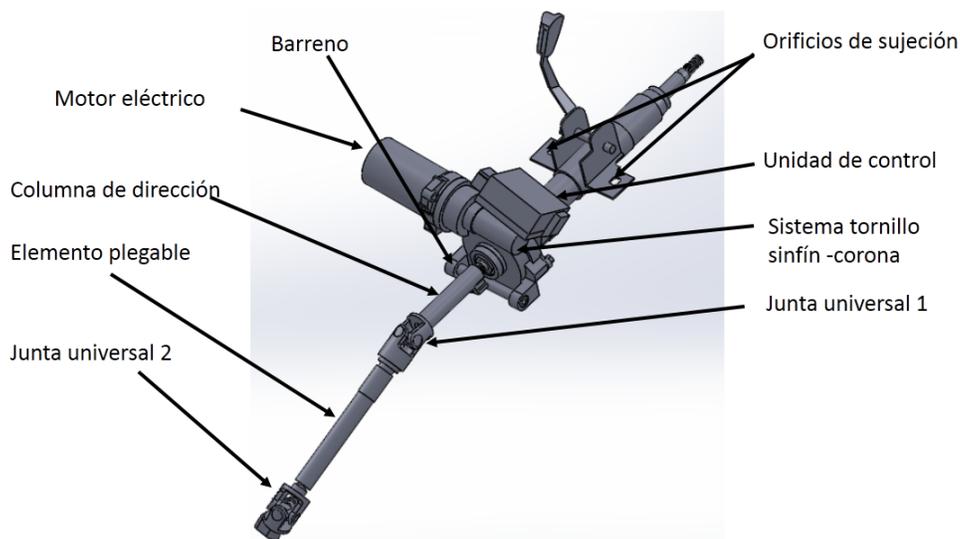


Figura 3.14: Modelo del sistema DAE.

aún cuando los ejes de entrada y salida del par de dirección forman cierto ángulo. Para el conductor, estas juntas le permiten modificar la inclinación del volante para su confort, véase [55]. En el caso de esta plataforma, se tomó ventaja de las juntas para reducir el espacio que ocupa la columna de dirección.

Para brindar un soporte correcto a la columna de dirección, la estructura superior se diseñó tomando en cuenta los orificios y el barreno de sujeción de la DAE comercial, obteniéndose la estructura que se muestra en la figura 3.15. A esta estructura se le agregó también una base para la batería del sistema y otra para una computadora.

Con la estructura superior finalizada, se prosiguió al ensamble final de toda la plataforma el cual se muestra en la figura 3.16. Para la unión entre la estructura superior y la inferior se propusieron pernos  $M6 \times 1.5 - 50$ , para la unión tanto del sistema DAE con la estructura superior como del sistema piñón-cremallera y la estructura inferior se propusieron pernos de  $M10 \times 2 - 50$ . Con esto se finalizó el diseño de la plataforma y con él fue posible prever detalles para su construcción.

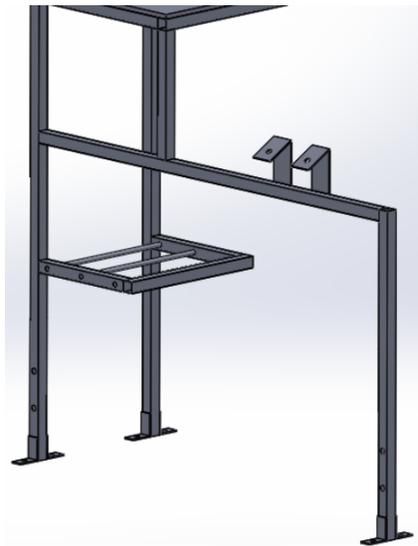


Figura 3.15: Modelo de la estructura superior.

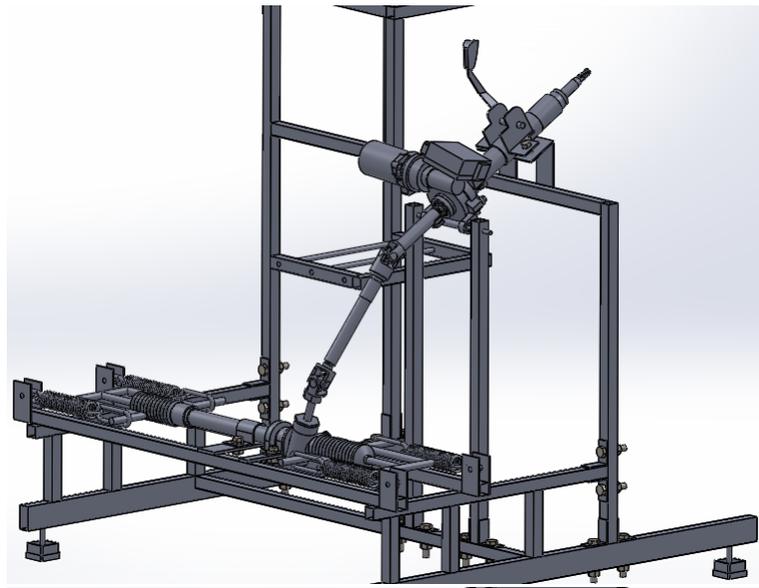


Figura 3.16: Ensamble final de la plataforma.

### 3.5. Construcción de la plataforma

Conociendo ya las dimensiones de las diferentes estructuras que conforman la plataforma, se realizó la construcción de la misma comenzando por la estructura superior. Se realizaron

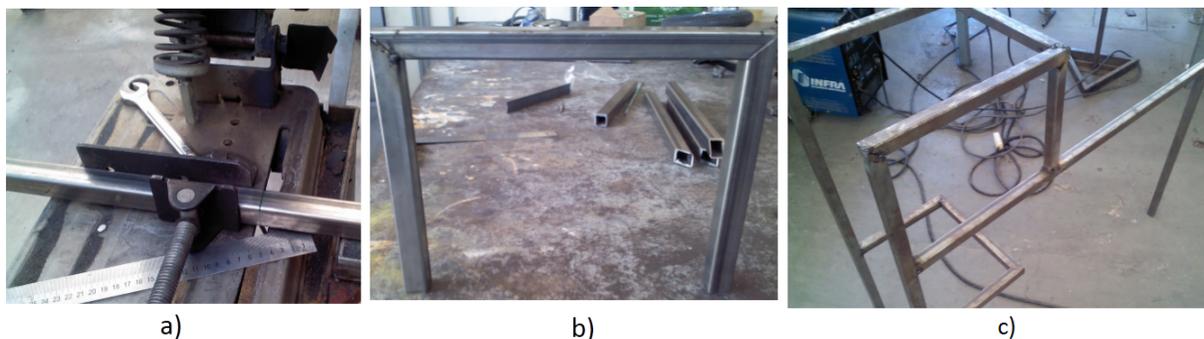


Figura 3.17: Construcción de la estructura superior.

cortes de los perfiles cuadrados a  $45^\circ$  para posteriormente ser unidos mediante un cordón de soldadura utilizando electrodos E6013 de  $3/32''$ , tal como se observa en la figura 3.17. Cabe mencionar que al inicio solo se colocaron puntos de soldadura para poder alinear correctamente los elementos y posteriormente agregar los cordones completos.

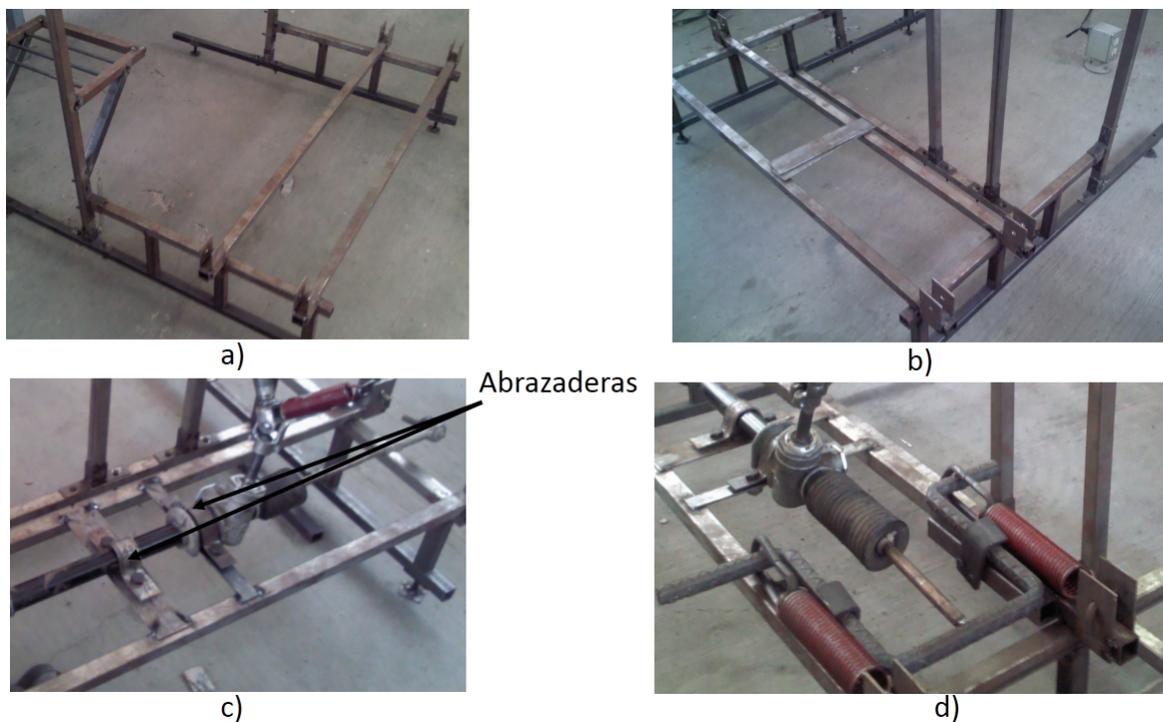


Figura 3.18: Construcción de la estructura inferior.

Una vez concluida la estructura superior se continuó con la inferior, siguiendo el mismo procedimiento, para finalmente obtener la estructura que se muestra en la figura 3.18. En esta

figura se muestran dos abrazaderas que se manufacturaron utilizando solera plana de  $2'' \times 1/8''$  y  $1'' \times 1/8''$ . Para la corredera que se propone en el modelo de la figura 3.13, se utilizó varilla de  $5/8''$  que fue doblada mediante calor para obtener el perfil deseado. Una vez hechas las dos

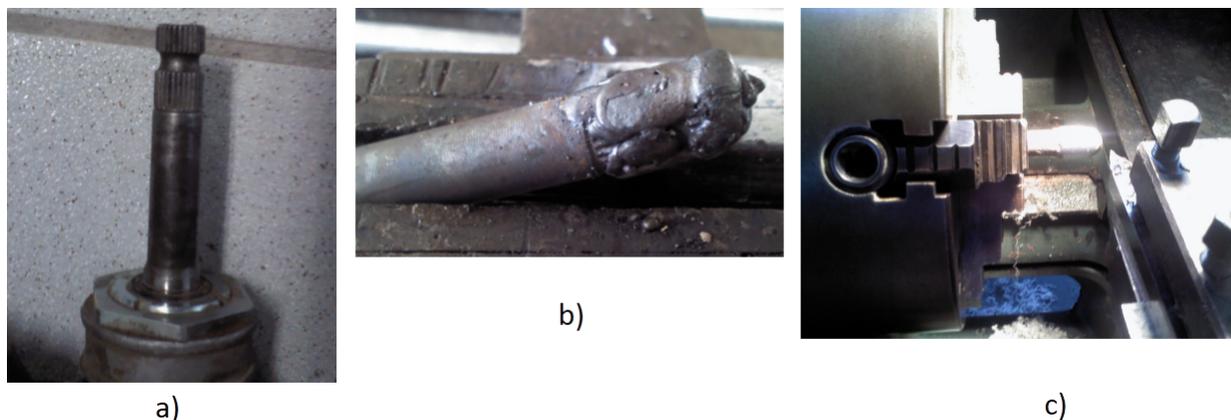


Figura 3.19: Modificación del eje del piñón.

correderas, se cortó la cremallera a la medida requerida y se soldaron ambas. Finalmente se utilizaron varillas de  $3/8''$  a las cuales también se les aplicó calor para poder ser dobladas y obtener las guías para las correderas. El ensamble de estos elementos se muestra en la figura 3.18 d). Como ya se había previsto al obtener los modelos CAD de la cremallera y la DAE, el diámetro del eje del piñón es ligeramente menor al de la junta universal 2 que se observa en la figura 3.14, por lo tanto hubo que modificarlo. Para esto se extrajo el piñón y se le agregó



Figura 3.20: Plataforma de dirección automotriz asistida eléctrica.

material a su eje mediante el proceso de soldadura. Una vez obtenido un diámetro ligeramente mayor al de la junta universal, se utilizó el torno y se desvastó el eje hasta obtener el diámetro de la junta universal. También mediante el proceso de torneado se le generó un estriado al eje para asegurar mayor agarre con el estriado interno de la junta universal; este proceso se observa

en la secuencia de imágenes de la figura 3.19.

Finalmente se unieron todas las partes de la plataforma mediante los tornillos de sujeción, se realizaron ajustes de alineación de algunos elementos para posteriormente aplicarle pintura. La plataforma puede observarse en la figura 3.20, antes y después del proceso de pintado.

Como se mencionó antes el armado de la estructura mecánica, fue posible mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico. A lo largo del desarrollo de este proceso se concluye como aprendizaje que es necesario tomar en cuenta la contracción del metal causado por la aplicación del cordón de soldadura y del calor que ésta genera, ya que a pesar de cumplir con las dimensiones exactas de cada pieza, se pueden presentar errores al momento de realizar las uniones tal que no encajen de manera correcta. Este problema suele solucionarse mediante la aplicación de puntos estratégicos de soldadura a las piezas, en lugar de cordones completos. Una vez presentadas las piezas y corroborando su correcta posición se aplican los cordones completos. Esta estrategia permite también corregir cualquier error de alineación debido a que es más sencillo eliminar la unión de los elementos en cuestión.

En la construcción de la estructura inferior fue necesario tener especial cuidado de cumplir con las especificaciones de diseño (dimensiones), debido a que esta estructura alberga el mecanismo piñón-cremallera y por lo tanto debe permitir y asegurar el movimiento correcto de dicho mecanismo. Uno de los principales retos que se tuvieron fue su alineación. Esto se logró empleando un nivel de gota y colocando cuñas metálicas entre el mecanismo y la estructura inferior. Una vez que éste se encontró fijo y alineado, se probó el movimiento de la cremallera, en busca de cualquier mal funcionamiento, tal como roces y obstrucciones. Se pudo verificar que no se presentó ninguna anomalía en el movimiento, además se comprobó que el método de sujeción utilizado (abrazaderas de sujeción) funciona correctamente ya que la carcasa que envuelve al mecanismo piñón-cremallera permaneció fija durante la operación del mecanismo.

# Capítulo 4

## Sistema DAE e interfaz de comunicación

En este capítulo se presenta el funcionamiento y características del sistema DAE de la marca Koyo. Se habla de las especificaciones del protocolo CAN 2.0 que es el que utiliza la DAE para comunicarse con los otros elementos del automóvil, especialmente con el módulo de control de carrocería (BCM, por sus siglas en inglés). Se establece comunicación con la unidad de control de la DAE mediante un módulo de comunicación CAN-BUS Shield marca Seed Studio.

### 4.1. Sistema DAE de Koyo Seiko Corporation

Como se ha mencionado, el sistema de dirección asistida eléctrica con la que se cuenta es de la marca Koyo Seiko, por lo tanto es necesario hablar sobre las características de los sistemas que esta empresa ofrece. En lo que respecta a los sensores de par torsional según [56], Koyo usa dos tipos de sensores, los de bajo costo y los de alto rendimiento; los primeros solo entregan la señal de par y los segundos entregan adicionalmente una medición del ángulo del volante. En este caso se trata de un sensor de par de bajo costo. El ángulo del volante es usado por otros sistemas como el sistema antibloqueo (ABS, por su siglas en inglés) y BCM para brindar mayor seguridad y confort.

Respecto al motor eléctrico de la DAE, Koyo desarrolló inicialmente motores de 25 A y en la actualidad motores de 65 A, no solo para vehículos subcompactos sino también para autos de mayor tamaño. Estos motores son de CD y cuentan con un embobinado de alta densidad, [56]. En este caso de acuerdo con [57] y [40] el motor es de corriente continua, a 12 V y de corriente nominal 58 A.

En la figura 4.1 se puede observar un diagrama eléctrico de la unidad de control electrónico, UCE, del sistema DAE. Note que la unidad usa un fusible de protección de 60 A y tiene como entradas el voltaje de encendido del automóvil y cuatro pines del sensor de par y como terminales de salidas tiene la alimentación del motor de la DAE. Adicionalmente se tienen cuatro pines para la comunicación CAN.

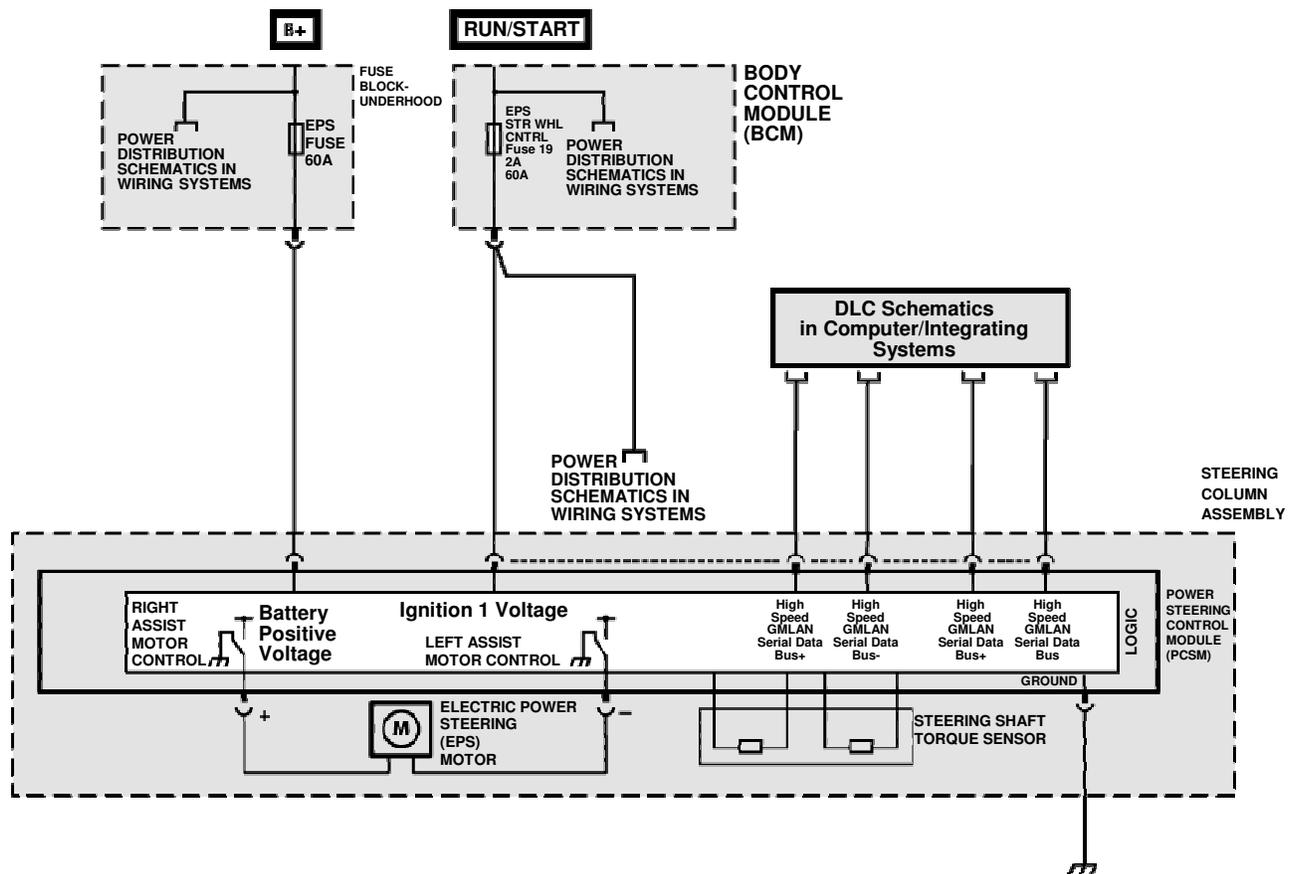


Figura 4.1: Diagrama eléctrico de la UCE de la empresa Koyo (tomada de [40]).

De acuerdo con [57], las entradas y salidas del UCE están agrupadas en los conectores C1, C2 y C3. Los conectores C1 y C3 tienen la forma que se muestra en la figura 4.2 y estos corresponden a la alimentación de la UCE (proveniente de la batería) y salida para alimentar al motor de CD respectivamente. Para esos conectores el pin 1 es voltaje positivo y el pin 2 es tierra. Con respecto al conector C2, éste se muestra en la figura 4.3 y la distribución de los pines se resume en la Tabla 4.1. Respecto al voltaje del pin 6, éste se refiere a la señal de encendido del automóvil sin el cual el sistema no inicia y que según [57] debe estar entre 9 y 16 V. Los pines 1, 2, 4 y 5 se refieren a las terminales de la comunicación, en este caso GMLAN, que es un protocolo de comunicación desarrollado por General Motors para la comunicación de los elementos dentro de los automóviles y está basado en el protocolo CAN, principalmente en la capa de transporte y aplicación, véase [58] y [59].

Como se menciona en [57], el UCE del sistema DAE tiene programado 8 curvas de cali-

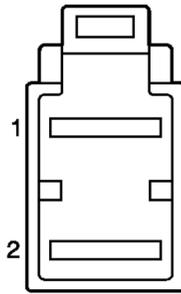


Figura 4.2: Conector C1 y C3 (tomada de [57]).

Tabla 4.1: Pines del conector C2.

Pines	Función
1	Bus serial de alta velocidad GMLAN (+)
2	Bus serial de alta velocidad GMLAN (-)
3	-
4	Bus serial de alta velocidad GMLAN (+)
5	Bus serial de alta velocidad GMLAN (-)
6	Voltaje de ignición

bración para diferentes niveles de asistencia. Dichos niveles pueden ser obtenidos mediante la programación del sistema de acuerdo a las condiciones de manejo. El UCE también cuenta con protección térmica en caso de sobrecalentamiento del motor o del circuito de control; cuando eso sucede el UCE disminuye la corriente aplicada en el motor y por lo tanto el nivel de asistencia se ve disminuida. Al igual que otros sistemas DAE, este recibe información a través del bus CAN, tales como la velocidad del vehículo y régimen del motor, esto para poder elegir el nivel de asistencia adecuado.

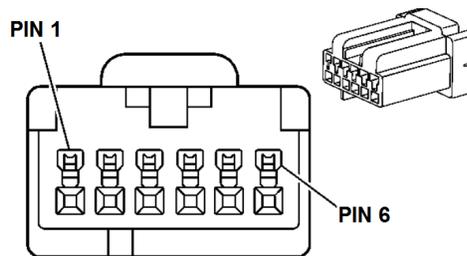


Figura 4.3: Conector C2 (tomada de [57]).

## 4.2. Protocolo CAN

Como se mencionó en la sección anterior la UCE de la DAE se comunica con los otros elementos del automóvil mediante el bus de comunicación GMLAN, este protocolo está basado en las especificaciones del protocolo CAN; por lo tanto tendremos que entender el funcionamiento

de éste.

El desarrollo del protocolo CAN (Controller Area Network, por sus siglas en inglés) comenzó en 1983 en la empresa Robert Bosch GmbH, con la finalidad de obtener un sistema de comunicación que permitiera una red de interconexión para los diferentes dispositivos electrónicos instalados dentro del automóvil, además de reducir la cantidad de cableado y agregar mayor funcionalidad, veáse [60]. Fue en 1986 cuando el protocolo CAN fue presentado de manera oficial ante el congreso de la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices, por sus siglas en inglés). Fue un año después que la firma Intel desarrolló por primera vez un chip controlador del protocolo CAN, [60]. En 1991 Bosch publicó las especificaciones del protocolo CAN en su versión 2.0 y dos años después fue estandarizado internacionalmente como el ISO 11898-1, veáse [61].

De acuerdo con [62], CAN es un protocolo de comunicación serial con soporte eficiente de distribución en tiempo real y alta seguridad. Este protocolo presenta las siguientes características:

- Priorización de mensajes.
- Garantía de tiempo de latencia.
- Flexibilidad de configuración.
- Recepción multicast con sincronización de tiempo.
- Consistencia de datos en todo el sistema.
- Multi maestro.
- Detección de error y señalización.
- Retransmisión automática de mensajes erróneos.
- Distinción entre errores temporales y permanentes.
- Permite una velocidad máxima de 1 Mb/s.

Además CAN consta de tres principales capas:

**Object layer (Capa de objeto)** El alcance de esta capa es detectar cuales mensajes van a ser transmitidos, decidir cual mensaje recibido por la capa de transferencia va ha ser usado y proveer de una interface a la capa de aplicación relacionado con el hardware.

**Transfer layer (Capa de transferencia)** Esta capa es el protocolo en si, es decir, controla el tramado, el arbitraje, errores de comprobación, señalización de errores y el confinamiento de fallas. En esta capa se decide si el bus está libre para el inicio de una nueva transmisión o si se ha iniciado el modo de recepción.

**Physical layer (Capa física)** Esta capa es el transmisor de los bits entre los diferentes nodos. También es la que controla todas las propiedades eléctricas.

Pueden haber dos configuraciones para CAN: de alta velocidad, que puede alcanzar hasta 1 Mb/s y de baja velocidad, que alcanza hasta 125 kb/s. La configuración de alta velocidad utiliza dos resistencias de  $120\Omega$  cada una al final del bus tal como se muestra en la figura 4.4 a). La configuración de baja velocidad es la que se observa en la figura 4.4 b) y para la cual existe una resistencia por cada nodo del bus, de tal manera que la resistencia total al final del bus resulte cercano pero no mayor a los  $100\Omega$ , veáse [63].

Los mensajes en el bus de comunicación son administrados mediante la prioridad de los mismos, de acuerdo al identificador del mensaje. Los mensajes con identificador numéricamente bajo son de prioridad mayor y entre mayor sea el valor del identificador la prioridad disminuye. De acuerdo con esto, si dos mensajes intentan ser transmitidos al mismo tiempo, el mensaje con identificador menor es transmitido primero, veáse [62].

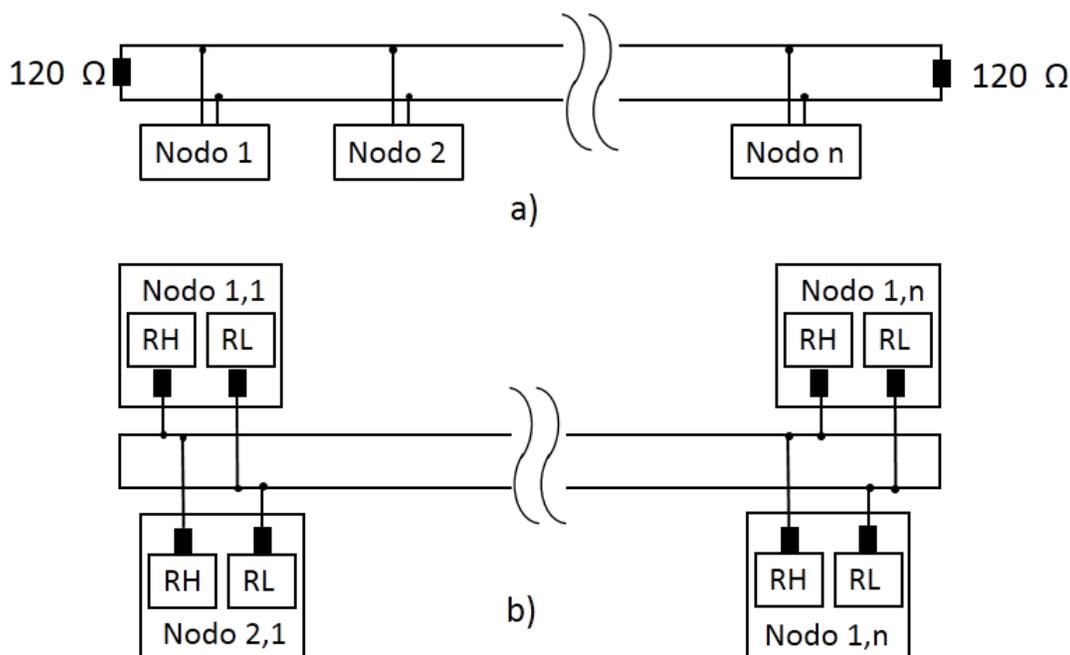


Figura 4.4: Conexión del bus CAN de alta velocidad(a) y baja velocidad (b) (tomada de [63]).

Existen dos formatos de mensaje del protocolo CAN, el formato estándar y el formato extendido; el formato estándar usa 11 bits del mensaje como identificador y el formato extendido usa 29 bits. La trama total de un mensaje CAN es como el que se aprecia en la figura 4.5. En el campo de arbitraje se encuentran los 11 bits del identificador en el caso del formato estándar o 29 bits en el caso del formato extendido. Como ya se vió, el bus consta de un par trenzado con resistencias al final del mismo. En el protocolo CAN los bits son llamados Dominantes (0 lógico) y Recesivos (1 lógico). Las dos líneas del bus son llamados CAN High y CAN Low y estas transmiten los bits en espejo tal como se muestra en la figura 4.6, el tiempo  $t$  del bit está definido por la velocidad de transmisión, así que como mínimo es de  $1\mu s$  cuando la transmisión es de 1 Mb/s. En el bus todos los nodos reciben todos los mensajes que se transmiten, pero éstos, solo responden a los mensajes con un identificador en específico.

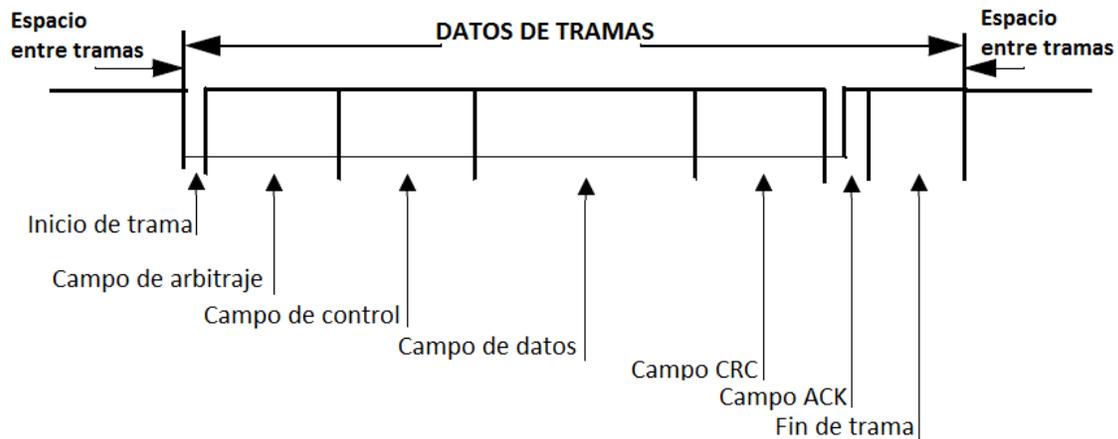


Figura 4.5: Trama CAN (tomada de [62]).

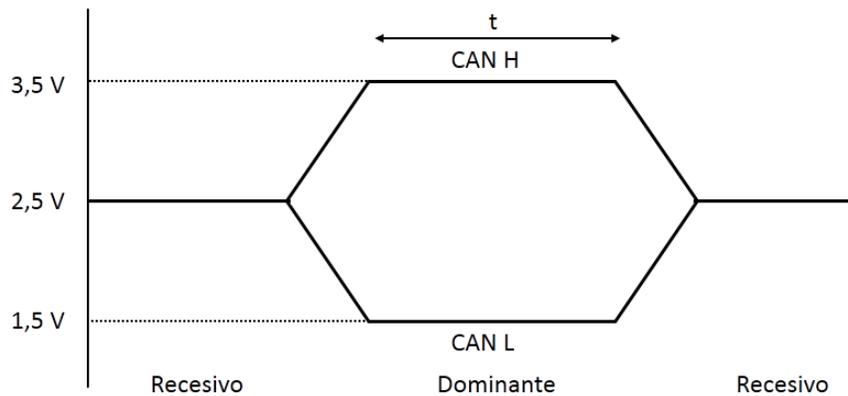


Figura 4.6: Señales del bus can.

Refiriéndose al sistema DAE que se estará usando, éste pertenece a un automóvil Pontiac G5. Este automóvil cuenta con dos tipos de buses CAN, de alta y baja velocidad. El bus de alta velocidad trabaja a 500 Kb/s y el de baja a 83.33 Kb/s. En este sistema se usa el término GMLAN(+) y GMALN(-) que son equivalentes a CAN HIGH y CAN LOW respectivamente.

### 4.3. Vehicle Spy®

Hasta el momento se han descrito las principales características del protocolo CAN, en este trabajo se supone que GMLAN posee al menos estas características. Sin embargo, para establecer comunicación con el sistema DAE, es primordial conocer el formato de las tramas que le son transmitidas. Para ello se utilizará una versión limitada del software Vehicle Spy®, el cual puede simular un nodo CAN y ser utilizado para la adquisición de los datos que fluyen en el bus y para monitoreo de los mismos, véase [64]. Este programa soporta protocolos:

- CAN, CAN FD.
- Automotive Ethernet.
- LIN.
- FlexRay.
- K-Line.
- J1939, J1708.
- GMLAN.
- Keyword.
- UART.
- CCP/XCP.
- ISO9141.
- ISO14229.

Una vez instalado el software se muestra una interfaz como la de la figura 4.7. Para la obtención de los datos, el programa hace uso de una terminal o dispositivo específico que puede ser encontrado en la página del fabricante, véase [64].

El programa permite realizar simulaciones del bus de comunicación, donde se puede observar todas las tramas que fluyen normalmente durante el funcionamiento del automóvil. Dentro de las simulaciones se puede realizar la del protocolo GMLAN. Esta simulación permite observar todas las tramas, los identificadores o ID's, el tamaño de las mismas, la velocidad con la que son recibidas y si pertenecen a la red de alta velocidad(llamado HS) o baja velocidad(llamado SW).

Cuando el programa Vehicle Spy® realiza una simulación, en realidad consulta una base de datos en formato de Excel® del funcionamiento del automóvil en operación normal. En dicha base de datos se muestra todas las tramas, las cuales suman un total de 11801 y que son mostradas durante la simulación del programa. Otro aspecto importante que se pudo observar en la simulación es que los valores de los identificadores de los mensajes son todos representados por tres dígitos en formato hexadecimal, es decir, que estos no sobrepasan los 12 bits. Por lo tanto, se tratan de tramas en formato estándar.

Una coincidencia favorable para el desarrollo de esta tesis es que las tramas de esta base de datos pertenecen al protocolo estándar GMLAN el cual es utilizado en el Pontiac G5 que es el automóvil al cual pertenece la DAE utilizada en esta investigación. Sabiendo esto es posible tomar los datos y transmitirlos a través de un bus CAN mediante un controlador de dicho protocolo para establecer la comunicación con la DAE.



Figura 4.7: Intefaz gráfica del programa Vehicle Spy® .

## 4.4. CAN-Bus Shield

El CAN-Bus Shield V 1.2 es un módulo controlador de protocolo CAN de la marca Seed Studio® el cual es compatible con la plataforma Arduino®. Este controlador soporta los formatos estándar y extendidos de las tramas CAN y es capaz de manejar velocidades de 5kb/s hasta 1Mb/s, veáse [65]. Tal como se menciona en la página del fabricante, esta plataforma es de software libre, así que es posible obtener la biblioteca para el entorno de desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) de Arduino® y programar el controlador de acuerdo a nuestras necesidades, veáse [65].

El controlador puede observarse en la figura 4.8. Éste cuenta con un circuito integrado MCP2551, llamado transceiver(transceptor), que es el que se encarga de convertir los mensajes a los niveles de voltaje propios del protocolo y el integrado MCP2515, que es en sí el controlador, el cual ejecuta las reglas del protocolo CAN y se comunica con el microcontrolador ATMEGA328p embebido en la tarjeta Arduino®.

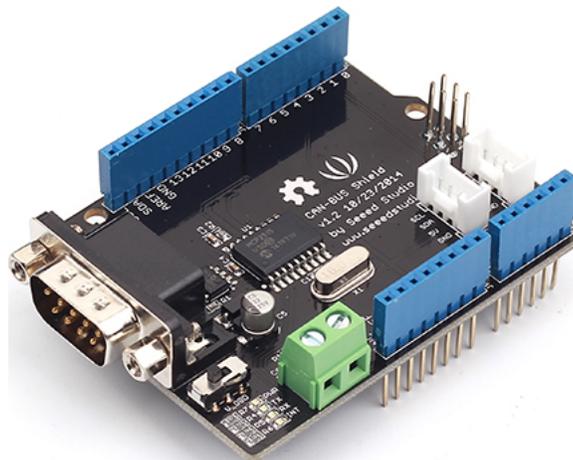


Figura 4.8: Controlador de protocolo CAN: CAN-Bus Shield de Seed Studio® (tomado de [65]).

La interacción entre la tarjeta Arduino® y el CAN-Bus Shield es la siguiente: la tarjeta Arduino® indica al controlador el mensaje a ser enviado, el controlador convierte el mensaje en alguno de los dos formatos de CAN y lo transfiere al transceptor el cual se encarga de convertir el mensaje a los niveles de voltaje indicado. En la operación contraria es el transceptor el que recibe inicialmente el mensaje, este verifica que el mensaje haya llegado sin errores, y una vez hecho esto, verifica si el identificador del mensaje recibido es el mismo a la de la unidad CAN a la cual pertenece; de ser así el mensaje es enviado al controlador, de lo contrario es desechado, veáse [66]. Una vez que el controlador tenga un nuevo mensaje, este es enviado hacia la tarjeta Arduino® para su procesamiento.

Sabiendo esto, es entonces posible tratar de establecer comunicación con la UCE de la DAE ya que de acuerdo con [57], esta unidad de control utiliza el bus CAN de alta velocidad a 500Kb/s y como se observó en la simulación del programa Vehicle Spy® las tramas son en formato estándar.

## 4.5. Comunicación

Para establecer comunicación con la DAE lo primero que se realizó fue separar las tramas dedicadas al bus de comunicación de alta velocidad de las del resto, contenidas en la base de datos del programa Vehicle Spy<sup>®</sup>. Esto se llevó a cabo mediante un algoritmo escrito en lenguaje Python que genera otro archivo de texto el cual contiene estas tramas y sus respectivos identificadores. Con este archivo de texto y mediante el paquete de comunicación serial **pyserial 2.7** para Python, es posible leer una trama y enviarla a la tarjeta Arduino<sup>®</sup> mediante comunicación serial, procesar la trama para obtener el identificador y el mensaje y posteriormente enviarlo por el bus mediante el CAN-Bus Shield.

Pero antes de lograr esto es necesario energizar la DAE de manera correcta y activarla mediante el voltaje de encendido del automóvil, tal como se mencionó en la Sección 4.1. Para emular la señal de encendido del automóvil se utiliza una fuente de laboratorio de 12 V, la alimentación de la DAE es suministrada por una batería de automóvil de 12 V y tal como se indica en [57] es necesario colocar dos fusibles de protección en paralelo entre la batería y la UCE, como se muestra en la figura 4.9. Una vez armado el circuito, se hicieron pruebas de

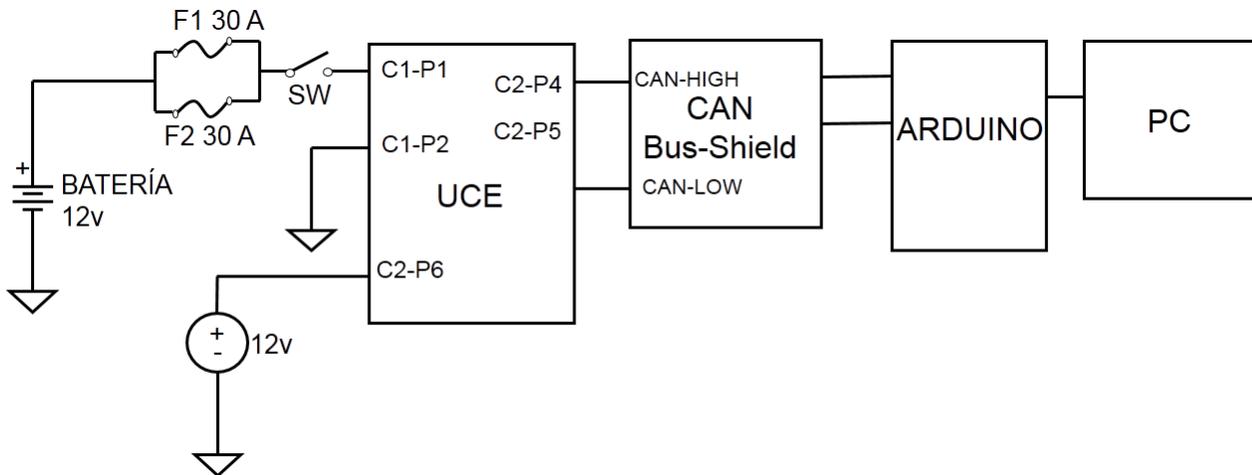


Figura 4.9: Circuito de alimentación y comunicación con la UCE de la DAE.

encendido, es decir, se alimenta la UCE y posteriormente se ingresa la señal de encendido del automóvil. Al hacer esto el sistema se activa pero la asistencia no se inicia para activarla es necesario establecer la comunicación con la UCE, ya que si esta unidad no recibe los comandos o tramas correctas la asistencia no se establece. Para lograr lo anterior, se diseñaron los siguientes algoritmos para crear un bus de comunicación entre la UCE y el CAN-Bus Shield:

---

**Algoritmo 1:** Lectura de archivo de texto en python.

---

**Datos:** archivo  
**Resultado:** trama

```
1 mientras true hacer  
2   Abrir archivo  
3   mientras no sea fin de archivo hacer  
4     Leer una trama del archivo  
5     Envía línea por puerto serie  
6     si Hay respuesta en puerto serie entonces  
7       Leer respuesta  
8       Mostrar respuesta en pantalla  
9     esperar
```

---

---

**Algoritmo 2:** Envío de tramas en placa Arduino®.

---

**Datos:** Trama  
**Resultado:** Mensaje CAN

```
1 mientras true hacer  
2   Recibir trama de manera serial  
3   Convertir trama a hexadecimal  
4   Enviar trama por CAN  
5   si Hay respuesta CAN entonces  
6     Leer respuesta CAN  
7     Enviar respuesta de manera serial
```

---

El desempeño de la implementación de estos algoritmos se muestra en la Sección de Resultados.



# Capítulo 5

## Acondicionamiento y adquisición de señales

Como se planteó, uno de los objetivos es hacer de esta plataforma un sistema abierto para poder realizar trabajos e investigaciones con fines académicos. Para lograr esto es necesario poner a disposición del usuario las variables principales del sistema, como son la corriente que fluye por el motor y el par ejercido en la columna de dirección. En este capítulo se describen los circuitos desarrollados para acoplar y adquirir las señales de corriente y par de la plataforma.

### 5.1. Sensor de corriente

Una de las señales más importantes de este sistema es la corriente del motor, ya que con ella es posible establecer un nivel de asistencia deseada ante un esfuerzo o entrada de par en la columna de dirección. Como se vió en la sección 4.1 el motor de la DAE puede llegar a consumir hasta 58 A durante su operación, dado que se pretende operar el motor a niveles de corriente por debajo de este límite, se optó por el sensor NT-50 de la marca F.W. BELL®. Este sensor

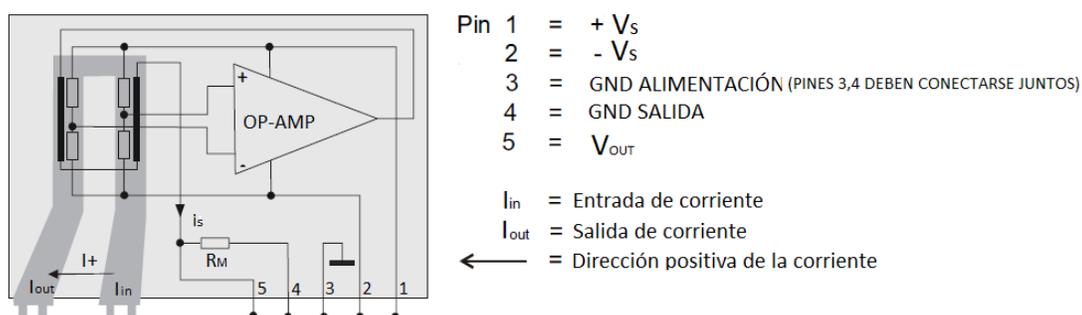


Figura 5.1: Sensor de corriente magnetorresistivo NT-50 (tomada de [67]).

es de efecto magnetorresistivo, es decir, utiliza un material cuya resistencia eléctrica varía de acuerdo a la intensidad del campo magnético en el que se encuentre. El sensor emplea un puente de Wheatstone para traducir las variaciones en el campo magnético generado por el paso de la corriente a través de su conductor primario, véase [67]. El NT-50 soporta una corriente nominal de 50 A con picos de hasta 150 A (durante 3s). El voltaje de salida del sensor es de  $\pm 2.5$  V

cuando la corriente es de  $\pm 50$  A, y es necesaria una alimentación simétrica de al menos 12 V para su correcto funcionamiento. Un diagrama de este sensor se muestra en la figura 5.1.

El sensor se colocó entre la UCE de la DAE y el motor eléctrico, posteriormente se inició la asistencia y se estableció la columna de dirección a un ángulo entre  $410^\circ$  y  $430^\circ$ , que como se verá en la Sección 6.2 de Resultados, es el rango al cual se experimenta el par de carga mayor. Para este ángulo, el voltaje de salida del sensor fue de 633 mV, que es equivalente a una corriente de 12.66 A.

Se adaptó una placa de circuito impreso para este sensor procurando su correcta alimentación y salidas para su posterior lectura.

## 5.2. Acondicionamiento de la señal del sensor de par

Como ya se vió, la empresa Koyo desarrolló un sensor de par de no contacto y de tipo magnetorresistivo para poder medir el par que aplica el usuario en el volante. De acuerdo con [57], la DAE del automóvil Pontiac G5 incluye un sensor de este tipo. Este sensor cuenta con dos bobinas, las cuales ante una entrada de par y debido a que comparten un núcleo de material flexible, la impedancia de una de las bobinas cambia (bobina de detección), mientras que la otra permanece constante (bobina de compensación), permitiendo con ésta última, eliminar factores externos como la temperatura, al momento de la medición, veáse [48].

Para obtener una lectura del par ejercido, es imprescindible medir las variaciones de impedancia en la bobina de detección. De acuerdo a [49] y [68] esta medición se puede realizar empleando un circuito oscilador, una etapa de rectificación y detección y un subcircuito de diferenciación, tal como se muestra en la figura 5.2.

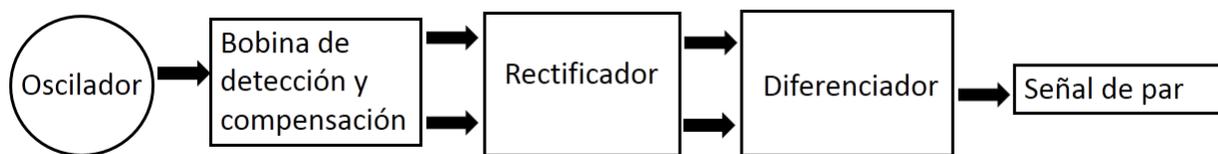


Figura 5.2: Diagrama a bloques para la lectura del sensor de par(tomado de [68]).

La señal sinusoidal proveniente del oscilador es aplicada a las dos bobinas, posteriormente la caída de voltaje en cada una de éstas es rectificadas, y la diferencia de ambas señales rectificadas es amplificada para así obtener un voltaje equivalente al par que se ejerce en la columna de dirección. Sin embargo, en [49] y [68] no se proporciona mayor detalle de la naturaleza de la señal de oscilador ni de los circuitos utilizados en cada etapa, por esta razón se propuso un sistema propio de detección, retomando estos conceptos.

Lo primero que se realizó fue determinar las características de la señal sinusoidal aplicada a las bobinas de la siguiente forma: auxiliándose del diagrama del sensor de Koyo de la figura 2.15 y de la distribución eléctrica del sistema DAE, visto en la sección 4.1; se midió la señal que era ingresada a las bobinas con un osciloscopio. Dicha señal se muestra en la figura 5.3.

Como se puede observar, se trata de una señal sinusoidal, con una amplitud pico-pico de 3.2 V y una frecuencia de 3.5kHz. Esta información es fundamental para evitar un posible daño o mal funcionamiento del sensor.

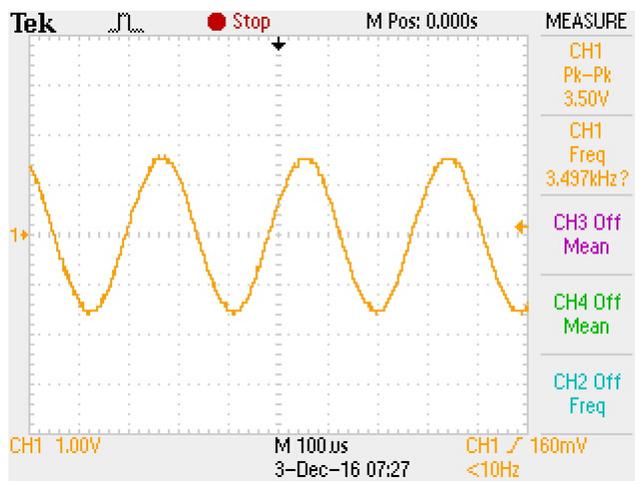


Figura 5.3: Señal aplicada a las bobinas del sensor de par.

Mediante el software Proteus<sup>®</sup> se realizaron simulaciones de las bobinas ante una entrada sinusoidal con las características ya mencionadas, mediante el circuito que se muestra en la figura 5.4. Para obtener los valores de inductancia de las dos bobinas del sensor, fue necesario

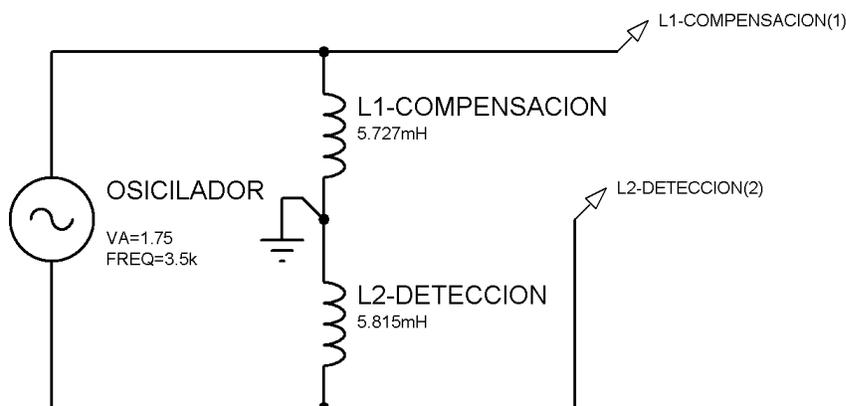


Figura 5.4: Circuito de simulación para las dos bobinas.

separarlas (desoldarlas) del circuito de la UCE. Posteriormente, utilizando un multímetro y con la opción de continuidad se identificaron las terminales de cada bobina. Finalmente, sus valores fueron determinados mediante un medidor de inductancias Synthesized In-circuit LCR/EESR Meter Modelo 886 de la marca BK PRECISIÓN<sup>®</sup> (véase figura 5.5). Esta medición fue realizada a una frecuencia de 10kHz, debido a que la frecuencia de operación se encuentra en ese rango(3.5kHz). De acuerdo con el manual de operaciones del medidor(veáse [69]), este tiene dos modos de medir la inductancia, el modo serie y el modo paralelo. La medición en modo paralelo



Figura 5.5: Medición de la inductancia de las bobinas.

se recomienda para valores de inductancia grandes y el modo serie para valores pequeños. Además, el modo paralelo se utiliza para bobinas con núcleo ferromagnético. En este caso, se inició midiendo en modo paralelo, y se obtuvo los valores de  $5.815mH$  y  $5.727mH$ , posteriormente en modo serie se obtuvieron los valores de  $4.637mH$  y  $4.484mH$ . Debido a que en el manual la especificación del rango para los valores pequeños y grandes de las inductancias es ambiguo, esto no se tomó en cuenta; pero sabiendo que las bobinas incluidas en la DAE tienen un núcleo de material ferromagnético, se ha optado por los valores medidos en modo paralelo.

Después de realizada la medición fue necesario conocer cual de las bobinas es la de compen-

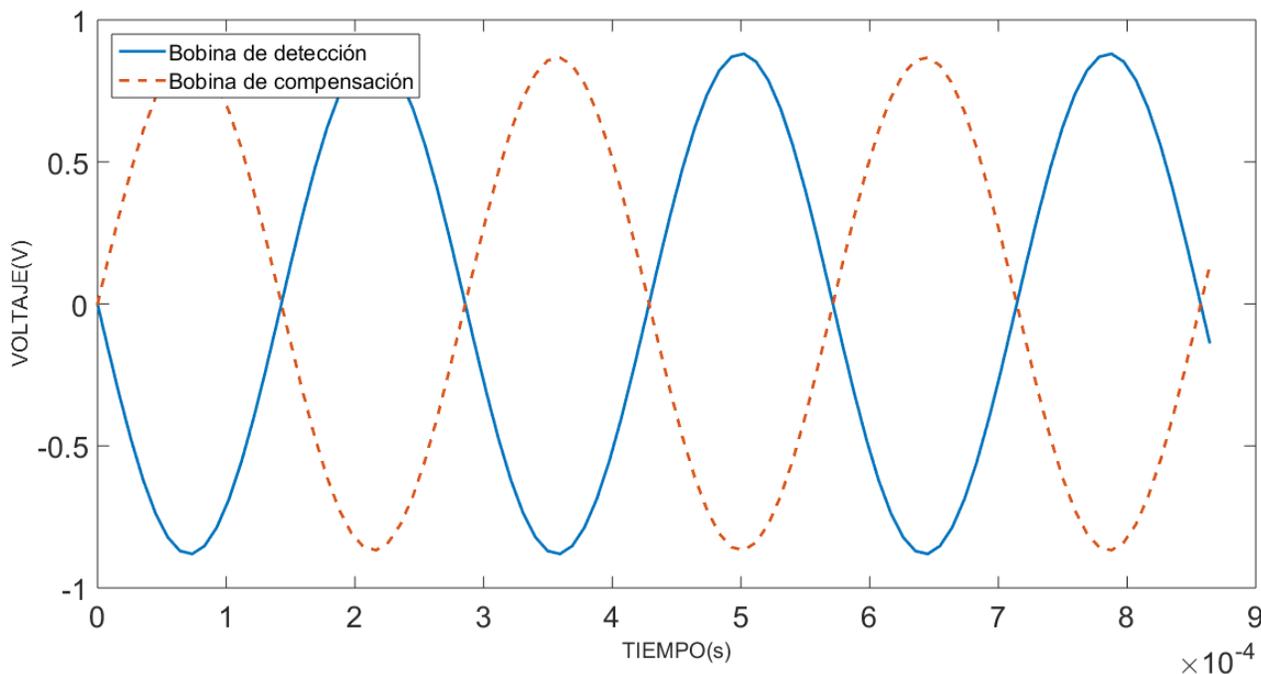


Figura 5.6: Resultado de la simulación del circuito de las bobinas.

sación y cual la de detección. La bobina de detección varía su valor al aplicar un par en la columna, la otra no, esta fue la manera de identificarlas.

Resumiendo, en estado de reposo la bobina de detección ( $L_D$ ) tiene una inductancia de  $5.815mH$  y la de compensación ( $L_C$ ) es de  $5.727mH$ . Una vez conocido los valores de las inductancias se prosiguió con la simulación. Se midieron los voltajes en las dos bobinas y se

compararon, véase figura 5.6. Como se puede observar el voltaje pico para la bobina de detección es de 878 mV y para la bobina de compensación es de 865 mV. La diferencia entre estas dos señales de voltaje crece o disminuye según varíe la inductancia de la bobina de detección, cabe mencionar que esta diferencia es pequeña para cualquier caso y deberá usarse un circuito de acondicionamiento de señal para su tratamiento.

### 5.3. Circuito de acoplamiento del sensor de par

Para obtener entonces una señal de voltaje que indique el par existente en la columna de dirección, es necesario procesar antes las variaciones de voltaje en las dos bobinas y adecuar la señal para su correcta lectura. Para lograr este acondicionamiento de señal se implementa el diagrama a bloques de la figura 5.7.

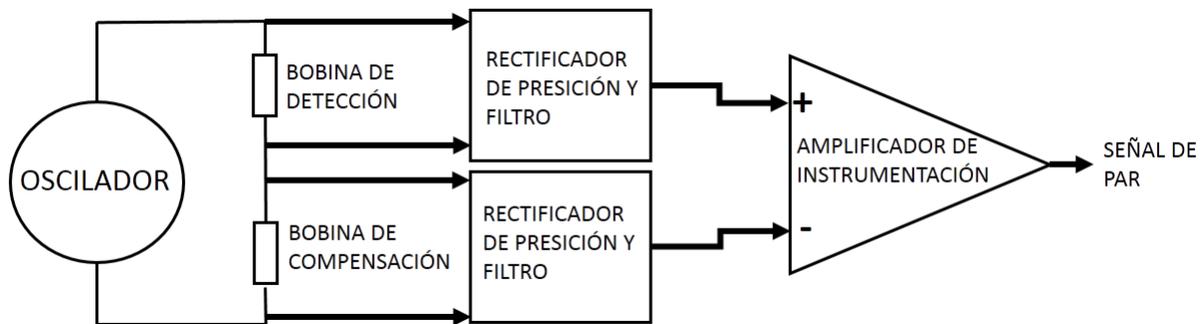


Figura 5.7: Diagrama a bloques del circuito de acoplamiento del sensor de par.

Éste consta de dos rectificadores, que convierten las señales de CA a señales de CD, las señales de salida pasan a un amplificador diferenciador de alta ganancia o amplificador de instrumentación. Con esto se tendrá una salida libre de los factores externos que pueden afectar la lectura del sensor.

#### 5.3.1. Rectificador de precisión

Como se ha dicho, las variaciones de voltaje en las bobinas, principalmente en la bobina de detección, están en el rango de milivolts, por lo que no es posible emplear una rectificación

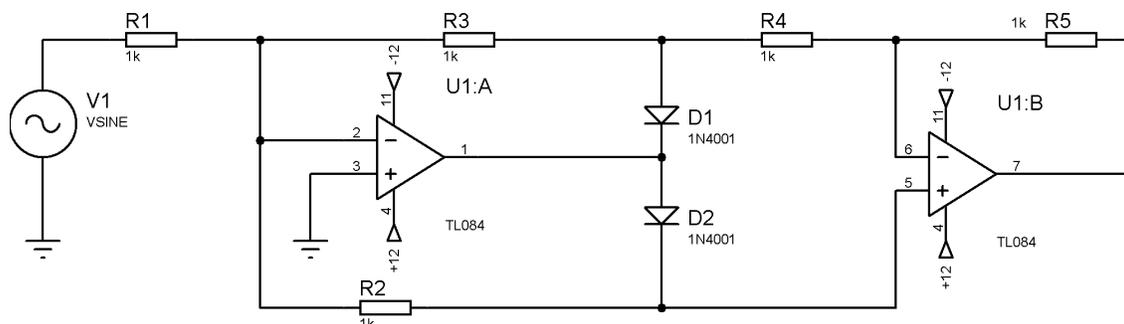


Figura 5.8: Circuito rectificador de precisión.

de onda completa convencional, ya que los diodos normales rectifican una señal a partir de los 0.6V. Para este caso, es necesario emplear un circuito rectificador que nos permita entradas más pequeñas y así tener menos pérdidas. Un rectificador que cumple con estas características es el rectificador de precisión de onda completa. Este circuito permite rectificar voltajes por debajo del voltaje de umbral de los diodos, en el rango de milivolts, veáse [70]. Este circuito emplea dos amplificadores operacionales y dos diodos. Los dos amplificadores actúan como amplificadores inversores cuando alguno de los diodos conduce. El rectificador de precisión se muestra en la figura 5.8. Como se puede observar este circuito emplea todas las resistencias iguales, por lo que la ganancia en cada etapa es de 1.

Este circuito también es conocido como circuito de valor absoluto, ya que transmite una polaridad de la señal de entrada (semiciclo positivo) e invierte la otra (semiciclo negativo), veáse [71]. Un análisis más a fondo de este circuito se presenta en el Apéndice D.

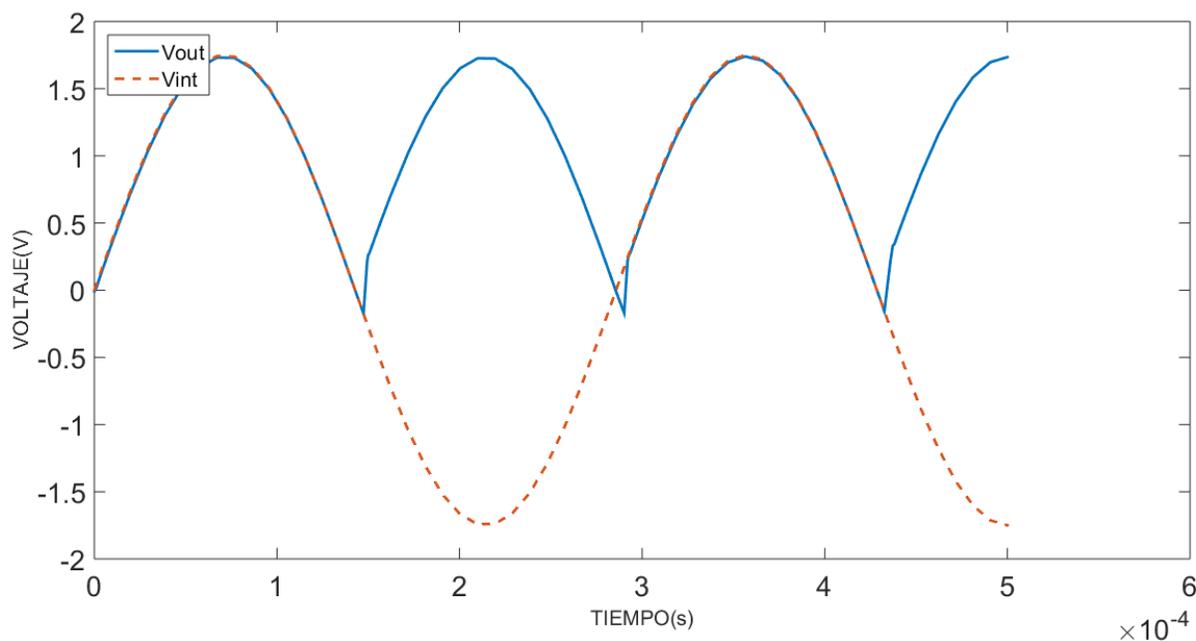


Figura 5.9: Comparación entre la entrada y la salida en el circuito rectificador de precisión.

El circuito se comprobó realizando una simulación mediante el software Proteus<sup>®</sup>, ante un voltaje de prueba de  $3.5V_{pp}$  y una frecuencia de  $3.5KHz$ , los resultados se muestran en la figura 5.9. Como se puede observar el voltaje puede llegar a ser negativo, aunque el valor es muy pequeño. Esto se debe a la frecuencia de operación, ya que para frecuencias por debajo de  $1.5kHz$  este efecto prácticamente desaparece. Para suavizar la señal de salida y elevar el valor promedio de voltaje de CD se agrega un filtro paso bajo RC al final de cada rectificador. Con esta modificación se obtiene un nivel de CD casi constante para un par constante en la columna de dirección. Este filtro se calculó para una frecuencia de corte  $f_c = 15Hz$  ya que el movimiento del volante es relativamente lento. Podemos calcular entonces el capacitor aplicando la ecuación (5.1) y proponiendo un valor de resistencia de  $1k\Omega$ , se obtiene un valor de capacitancia de  $10.6\mu F$  que se puede aproximar al valor comercial de  $10\mu F$ . Por lo que la frecuencia final de

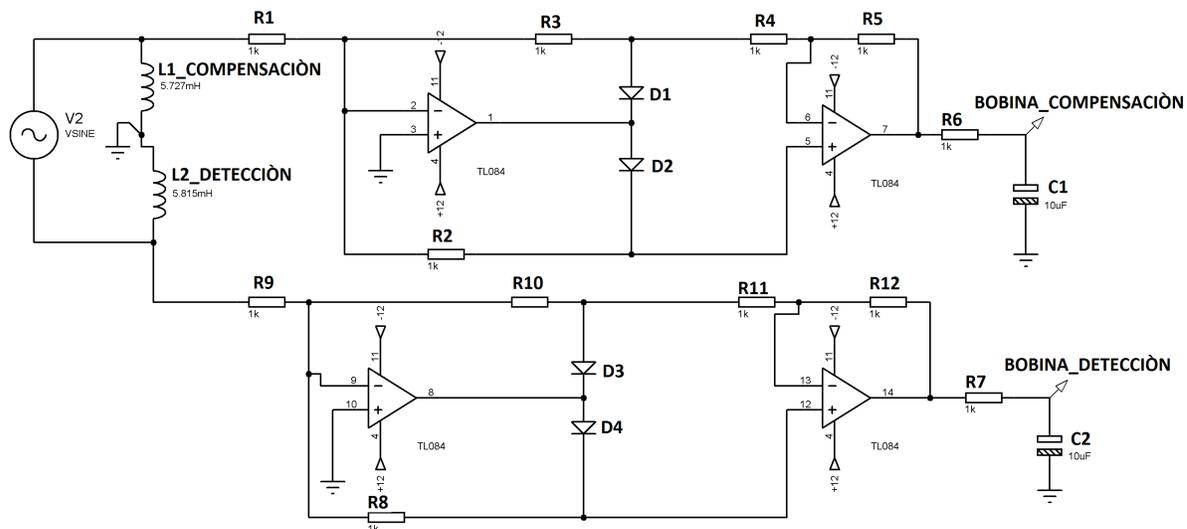


Figura 5.10: Circuito de acoplamiento entre las bobinas y los rectificadores.

corrente es  $15.91H\omega$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{5.1}$$

Habiendo comprobado la etapa de rectificación en simulación, es posible acoplarlo a las dos bobinas del sensor y agregar los filtros tal como se muestra en la figura 5.10.

Se realizó la simulación y se obtuvieron las señales mostradas en la figura 5.11. Como se puede observar el voltaje rectificado proveniente de la bobina de detección es de aproximadamente 538 mV y el de la bobina de compensación es de 530 mV, por lo tanto la diferencia es de 8mV.

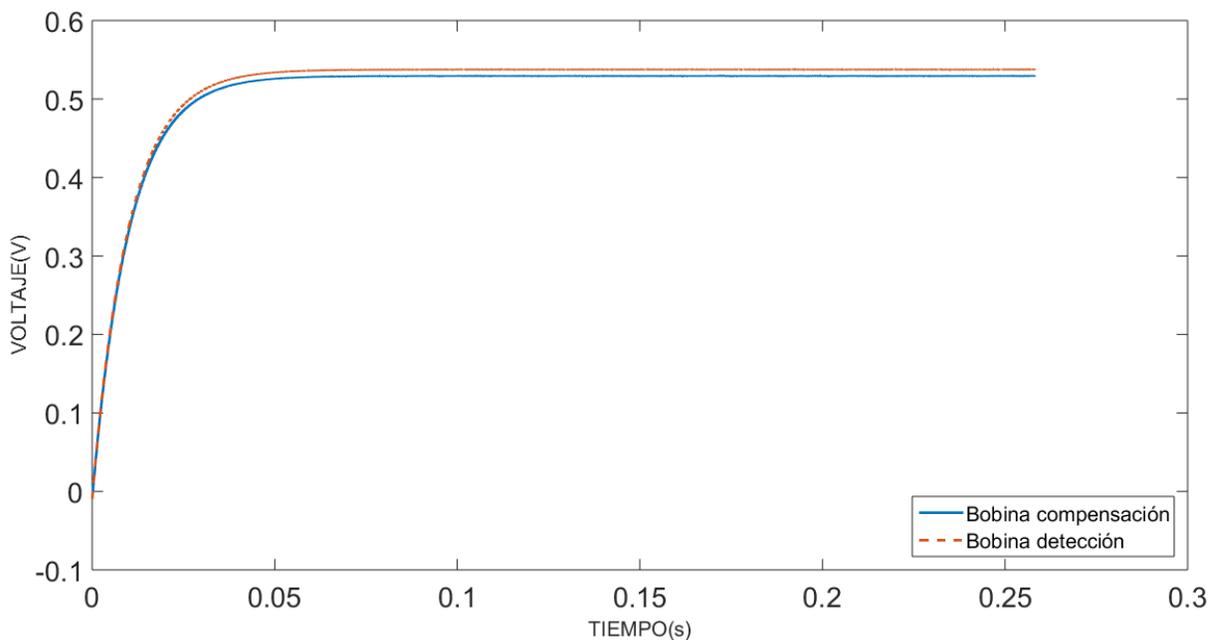


Figura 5.11: Voltajes rectificados de las bobinas.

### 5.3.2. Amplificador de instrumentación

Después de la etapa de rectificación y filtrado y de acuerdo con el diagrama mostrado en la figura 5.7, es momento de incluir un proceso de diferenciación y amplificación. Para esta etapa se requiere una alta ganancia de amplificación, por lo que se decidió utilizar el circuito integrado AD620. Este circuito integrado es un amplificador de instrumentación de alta precisión, es

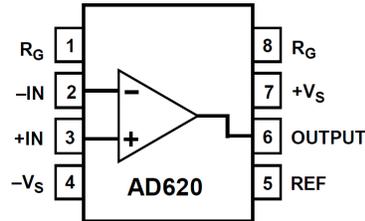


Figura 5.12: Diagrama del AD620(tomado de [72]).

decir, que es utilizado comúnmente en aplicaciones en las cuales los voltajes son muy reducidos, tal como la lectura de señales biológicas, véase [72]. El AD620 puede ser configurado para tener ganancias entre 1 y 10,000 utilizando solo una resistencia, lo que simplifica su uso. Dicha resistencia es colocada en las terminales 1 y 8 tal como se indica en la figura 5.12. De acuerdo con [72], la ganancia del AD620 está dada por la ecuación

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1, \text{ de lo que se deduce que } R_G = \frac{49.4k\Omega}{G - 1} \quad (5.2)$$

La sintonización de la ganancia resulta bastante sencilla, debido a que solo es necesario manipular el valor de una resistencia. Como se vió en la sección anterior, en simulación, la diferencia del voltaje rectificado entre la bobina de compensación y la de detección es de 8mV. Por lo tanto es necesario amplificar el voltaje lo suficiente ya que ese rango de voltaje no es conveniente. También se debe de considerar que si la amplificación es demasiada, es posible que se amplifique el ruido que acompaña a la señal, perjudicando su tratamiento posterior. Para este caso se eligió una ganancia de 50. Retomando la ecuación (5.2) se obtiene que  $R_G = 1008.16\Omega$  el cual se aproxima al valor estándar de  $1k\Omega$ . Establecido ya el valor de la resistencia  $R_G$  se agregó esta etapa a la salida de los rectificadores y se simuló, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 5.13. Como se puede observar la salida del AD620 es de 0.4 V que es aproximadamente 50 veces 8mV.

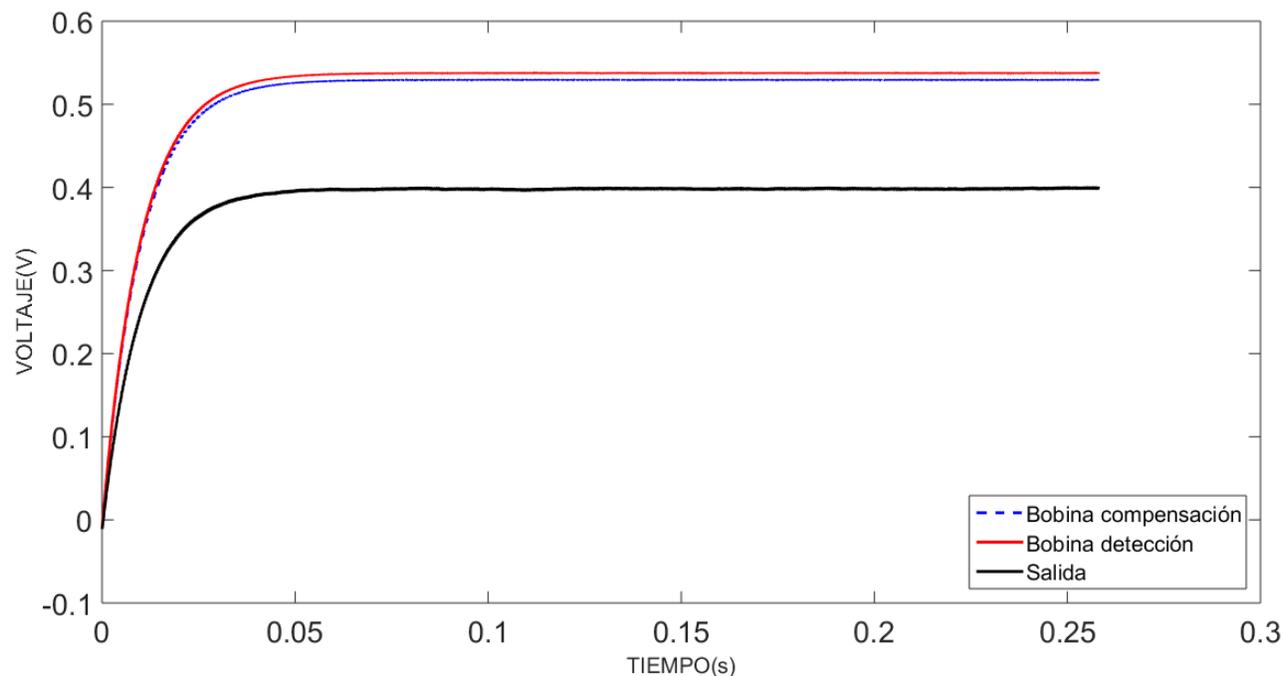


Figura 5.13: Comparativa entre las salidas de los rectificadores y la del AD620.

## 5.4. Circuito de escalamiento

Como se verá más adelante en la Sección de Resultados, las primeras pruebas del circuito de acoplamiento para la adquisición de la señal de par permitió demostrar que al aplicar un par en el sentido de las manecillas del reloj, el voltaje medido aumenta y al aplicar un par contrario el voltaje disminuye. Tal como se probó de manera experimental, el voltaje de salida cuando la columna se encuentra en reposo es de aproximadamente de  $87.9mV$  y al aplicar un par en sentido contrario a las manecillas del reloj, esta señal se llega a volver negativa. Se aplicó un

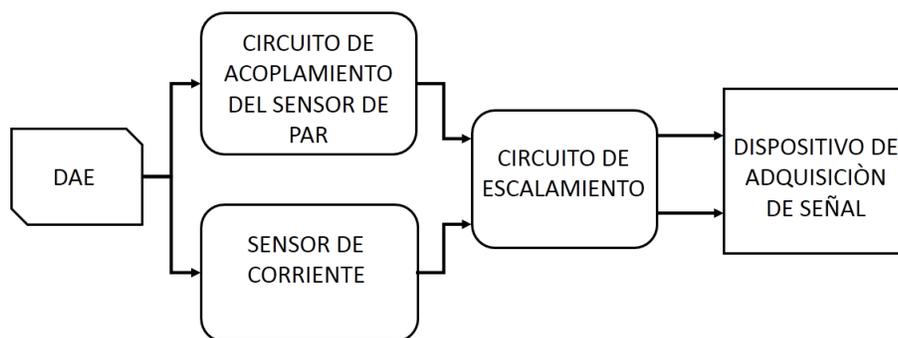


Figura 5.14: Diagrama de la etapa de escalamiento.

par de aproximadamente  $30Nm$  y a la salida de circuito de acoplamiento se obtuvo un voltaje de  $-1.18V$ . Por otro lado como se vió en la sección 5.1 el sensor de corriente tiene como salida un voltaje de  $\pm 2.5V$ , dependiendo del sentido e intensidad de la corriente que fluye, éste puede ser negativo.

Para la adquisición, tratamiento y control de estas dos señales, regularmente se utilizan dispositivos digitales, como un microcontrolador. La mayoría de estos dispositivos no permiten la lectura de voltajes negativos, de manera directa, por lo tanto, es necesario modificar estas señales para ubicarlas en un rango de voltajes positivos. Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es que cualquiera de las dos señales no debe incrementarse tanto, ya sea por la naturaleza de los mismos, sobre impulso, o por alguna falla en el circuito de la etapa anterior, esto con el objetivo de proteger al dispositivo de adquisición.

Es necesario entonces implementar una etapa de escalamiento de ambas señales, que se encar-

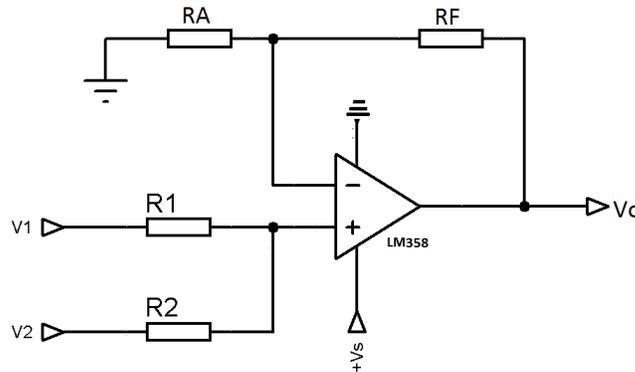


Figura 5.15: Amplificador operacional en su configuración de sumador no inversor.

que de mantener sus voltajes dentro del rango 0 a 5V y que será agregado antes de adquirir las señales, tal como se muestra en el diagrama de la figura 5.14.

Esta etapa de escalamiento se divide en dos, la primera consiste en aplicar una compensación u offset mediante un sumador, tal que la señal siempre sea positiva y la segunda de acotarla al rango de 0 a 5V. Como se sabe, el amplificador operacional en su configuración de sumador no inversor puede realizar esta tarea, además con la ventaja de tratarse de un circuito muy sencillo de implementar (véase figura 5.15). Un análisis de este circuito es presentado en el Apéndice E.

Dado que la salida del sensor de corriente se encuentra en el rango de  $[-2.5V, 2.5V]$ , es necesario sumarle 2.5V para ubicarlo en el rango requerido. Para el caso del sensor de par, considerando un par negativo máximo de  $30Nm$  (sentido contrario a las manecillas del reloj) la salida fue de  $-1.2V$ , por lo que se decidió sumarle 1.3V, anticipando algún sobreimpulso de la señal.

A pesar de que sumando los valores de voltaje indicados a cada señal se logra que estas sean mayores a 0V, es posible un mal funcionamiento de la etapa anterior, o mayormente, en el caso del sensor de par, una salida menor a  $-1.3V$ ; por lo tanto no es posible asegurar que a la salida de los sumadores se obtengan solo voltajes positivos. Por esta razón se optó por emplear el amplificador LM358, que de acuerdo con el fabricante (véase [74]) se trata de un amplificador operacional que puede ser operado como uno convencional, con la única diferencia de que solo es necesario una fuente positiva para su alimentación ( $+Vs$ ), por esta razón no pueden existir voltajes negativos a la salida.

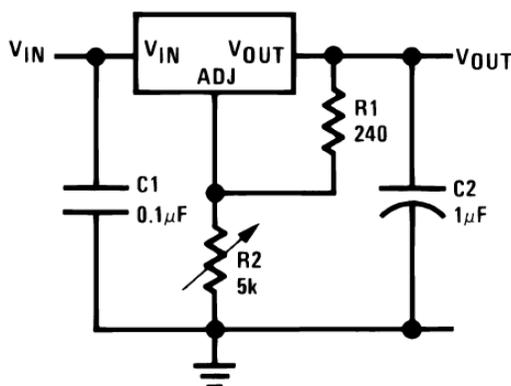


Figura 5.16: Regulador de voltaje LM317t(tomada de [73]).

Debido a que se propone sumar un voltaje de  $2.5V$  y  $1.3V$  a las dos señales respectivamente, dicho voltaje puede provenir de la fuente de alimentación positiva del LM328. Para esto, se propuso utilizar un regulador de voltaje para obtener estos niveles. El regulador de voltaje empleado es el LM317T, este regulador, de acuerdo con [73], puede ser ajustado desde  $1.2V$  hasta  $37V$  ya que solo requiere de dos resistores ( $R_1$  y  $R_2$ ) para tal propósito(ver figura 5.16) y que la diferencia entre el voltaje de entrada y salida esté dentro del rango de  $3V \leq (V_{in} - V_{out}) \leq 40V$ .

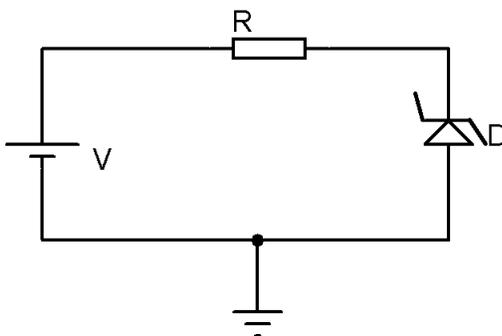


Figura 5.17: Diodo zener en polarización inversa.

Por otro lado, para la etapa de acotamiento, se puede emplear un diodo zener en polarización inversa, tal como se muestra en la figura 5.17. El diodo zener funciona de la siguiente manera, en polarización directa funciona como un diodo normal, sin embargo en polarización inversa presenta una muy alta resistencia que se mantiene hasta llegar a aplicar en sus terminales una tensión crítica llamada voltaje zener ( $V_z$ ). Cuando se le aplica al diodo en polarización inversa un voltaje igual o mayor a  $V_z$  la resistencia interna cae a un valor pequeño y la corriente a través del diodo se incrementa quedando limitada por la resistencia en serie externa del circuito, mientras que la tensión entre sus terminales permanece constante al valor  $V_z$ . Cuando el voltaje aplicado es menor a  $V_z$ , el diodo vuelve a su condición de alta resistencia interna con bajísimas corrientes inversas tal que el voltaje de salida es igual el voltaje aplicado al zener.

Debido a que no existe un diodo zener con  $V_z = 5V$ , se toma el estándar comercial más cercano, que en este caso es el 1N4733A con un  $V_z = 5.1V$ . Otro parámetro que se tiene que

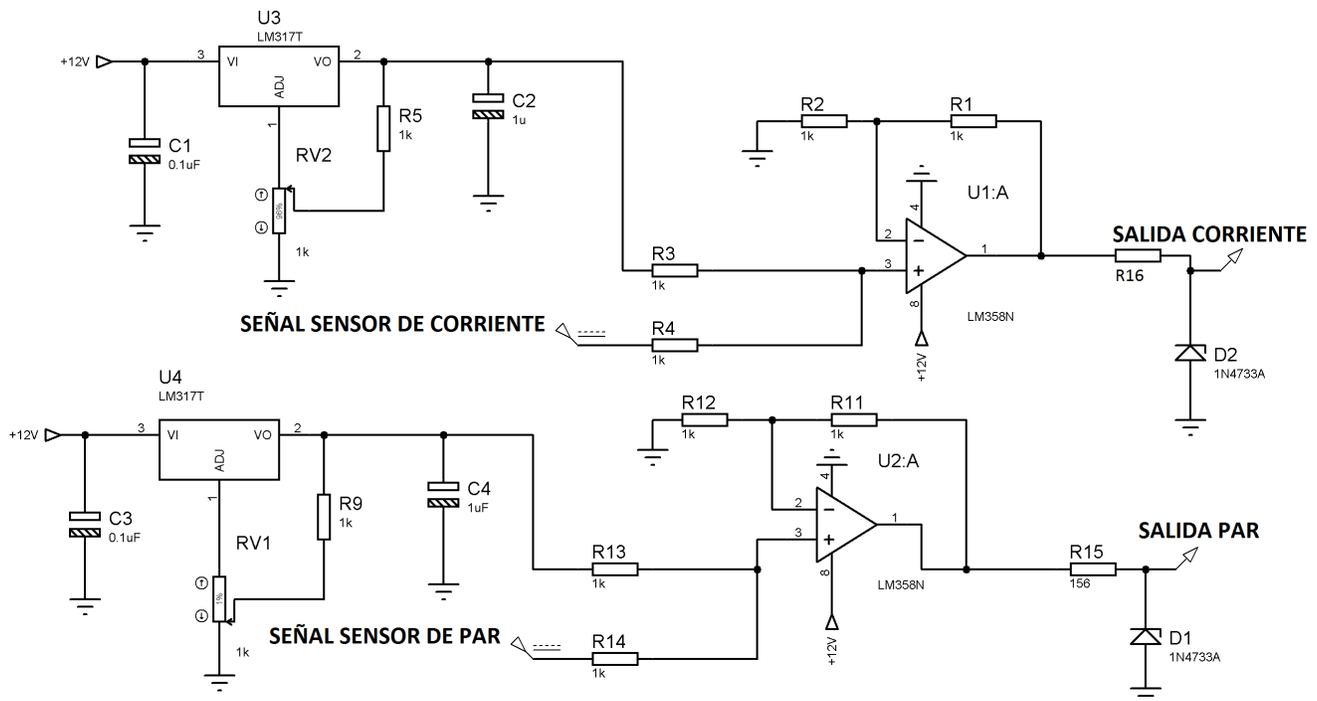


Figura 5.18: Circuito de escalamiento de las señales de par y corriente.

tomar en cuenta es la potencia que tendrá que disipar el diodo a consecuencia de la corriente que circulará por él. Este diodo puede disipar una potencia máxima de  $1.3W$ , y si se le demanda mucha más potencia éste puede dañarse. Por lo que debe limitarse con un valor de resistencia apropiado. Suponiendo una corriente máxima demandada de  $40mA$ , nivel de corriente comúnmente permitida a la entrada en la mayoría de los microcontroladores, y un voltaje de entrada máximo de  $12V$  (transitorio o pico), que es el voltaje de alimentación del LM358; podemos calcular entonces la resistencia limitadora  $R$  aplicando la fórmula (5.3). El factor de 1.1 es para tener un cálculo conservador de la resistencia.

$$R = \frac{V_{in} - V_z}{1.1(40mA)} = 156.8\Omega \quad (5.3)$$

Teniendo todos los elementos ya definidos, el circuito de escalamiento finalmente se muestra en la figura 5.18.

Suponiendo en simulación una entrada del sensor de corriente de  $-1.5V$  y del sensor de par de  $-0.8V$  se obtiene a la salida  $1.004V$  y  $0.5028V$  respectivamente, y con esto se comprueba el correcto funcionamiento de los dos sumadores, reguladores de voltaje y del diodo zener. También se probaron en la simulación dos casos atípicos: el primero en la que la señal de entrada de par y corriente son menores a  $-1.3V$  y  $-2.5V$  respectivamente. Al ocurrir esto, a la salida de ambos se obtienen como mínimo  $-0.0104V$  el cual es muy cercano a  $0V$ . El segundo caso, cuando la señal de entrada de par y corriente son mayores a  $3.7V$  y  $2.5V$  respectivamente, es decir, que para ambas señales la suma resultante del LM358 sea mayor a  $5V$ . Para esta prueba se obtuvo para las dos salidas un máximo de  $5.03V$  el cual es muy cercano a  $5V$ . Con esto se pudo comprobar el funcionamiento e importancia del circuito de acotamiento.

# Capítulo 6

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en los diferentes experimentos y desarrollos de este trabajo, como lo obtenido del proceso construcción, los problemas que se presentaron durante ella y la solución que se aplicó; también se habla de la interacción mecánica de los diferentes sistemas que conforman la plataforma. Se muestra la comunicación y los resultados que se obtuvieron a partir de ella y las comparaciones entre la plataforma con asistencia y sin asistencia. Sobre la etapa de instrumentación y caracterización de las variables, se muestran los resultados de la implementación de los diferentes circuitos ya vistos en el Capítulo 5.

### 6.1. Inspección del mecanismo de emulación de fuerza

Al concluir la construcción de la plataforma se inspeccionó la transmisión de movimiento giratorio de la columna de dirección al movimiento lineal de los resortes, posteriormente se comprobó la enlongación máxima de los mismos debido al movimiento del mecanismo de emulación de fuerza, ya que de acuerdo a lo planteado en el diseño esta debe ser de 7.5cm. Finalmente a pesar de que las piezas que componen a este prototipo pertenecen a diferentes automóviles y además con un grado de desgaste, se ha logrado un buen acoplamiento de la columna de dirección y el mecanismo piñón-cremallera.

### 6.2. Medición externa del par en la columna de dirección

Una vez construída la plataforma se prosiguió a determinar el par de entrada en la columna de dirección sin asistencia. Para esto se utilizó un medidor de la marca GEARWRENCH® modelo 85073, véase la figura 6.1, el cual puede medir pares de torsión de entre 7.5 Nm hasta 135.6 Nm. Este medidor funciona de la siguiente manera, una vez encendido y sin un par de entrada su pantalla muestra siempre el par máximo programado y el led indicador verde se encuentra apagado, cuando se le aplica un par de entrada el led verde se enciende y la pantalla muestra la magnitud del par aplicado, una vez que el par aplicado llega a ser igual o superior al par máximo programado el dispositivo emite una alerta auditiva.



Figura 6.1: Medición del par en la columna de dirección.

Se usaron marcas para conocer el ángulo de giro en todo momento y registrar así el par correspondiente. Los resultados que se obtuvieron se muestran en las tablas 6.1 y 6.2. Como se puede observar, el mayor par que experimenta la columna de dirección es de aproximadamente 30.4 Nm, el cual representa un esfuerzo considerable para un conductor. Con estos datos será posible observar la disminución del par aplicado en la columna de dirección cuando la asistencia se encuentre activa.

Tabla 6.1: Medición del par de entrada a la columna de dirección sin asistencia en sentido horario.

Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)
0	0	130	13.2	260	23.2	390	24.3
10	0	140	14.4	270	16.3	400	25.9
20	6.8	150	14.8	280	16.3	410	30.4
30	8.4	160	15.2	290	18.6	420	30.0
40	8.7	170	16.0	300	19.0	430	28.1
50	10.3	180	16.7	310	18.9	440	25.1
60	11.0	190	17.5	320	16.0	450	20.1
70	12.2	200	19.0	330	17.5	460	23.6
80	10.3	210	21.7	340	17.1		
90	11.4	220	23.6	350	17.9		
100	10.3	230	25.1	360	17.9		
110	11.0	240	23.6	370	19.8		
120	12.3	250	24.3	380	22.4		

Tabla 6.2: Medición del par de entrada a la columna de dirección sin asistencia en sentido anti horario.

Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)	Ángulo(°)	Par(Nm)
0	0	-130	-23.7	-260	-21.5	-390	-23.3
-10	-8.5	-140	-25.6	-270	-23.3	-400	-24.4
-20	-9.3	-150	-19.3	-280	-25.9	-410	-23.7
-30	-10.7	-160	-20.0	-290	-19.9	-420	-27.4
-40	-11.9	-170	-17.0	-300	-21.5	-430	-25.6
-50	-11.9	-180	-20.4	-310	-20.4	-440	-22.2
-60	-11.1	-190	-14.4	-320	-21.5	-450	-22.6
-70	-13.7	-200	-18.1	-330	-23.7	-460	-29.6
-80	-17.4	-210	-18.5	-340	-19.3		
-90	-18.9	-220	-15.9	-350	-23.7		
-100	-22.0	-230	-17.4	-360	-22.9		
-110	-23.3	-240	-18.9	-370	-21.5		
-120	-23.5	-250	-20.7	-380	-20.4		

### 6.3. Comunicación con la DAE y activación de la asistencia

Como ya se vió, en la Sección 4, la comunicación con la DAE se logró utilizando un módulo controlador de protocolo CAN compatible con la tarjeta Arduino® y unas tramas de comunicación obtenidas de la base de datos del software de monitoreo para automóviles Vehicle Spy.

Se dice que se ha logrado establecer una comunicación con el UCE por que de acuerdo con [75] las tramas de respuestas positivas, es decir cuando no existe error en la comunicación, deben contener como ID alguno de las siguientes valores: 0x40, 0x7E, 0xC0 y 0XFE. Antes de haber probado las tramas que arrojan respuestas positivas, se probó la comunicación utilizando tramas halladas en la literatura, sin embargo no pudo activarse la asistencia con dichas tramas y la respuesta por parte de la UCE generalmente era la trama 0xAAA 2 A8 3 0, siendo su ID 0xAAA.

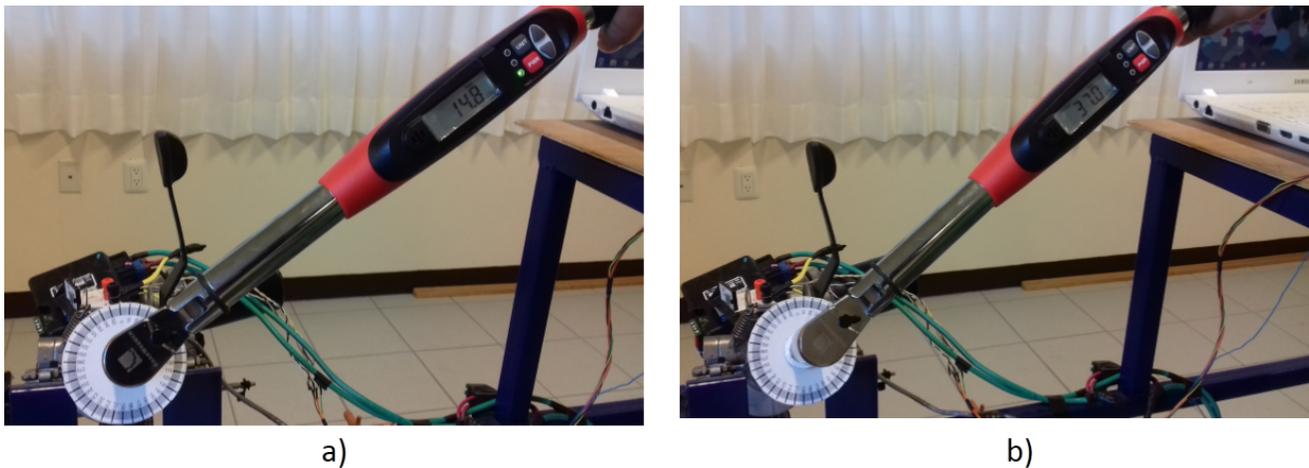


Figura 6.2: Medición del par sin asistencia(a) y con asistencia(b)).

Las primeras pruebas de activación de asistencia de la DAE se lograron utilizando las tramas que establecían comunicación con la UCE y los algoritmos 1 y 2 mostrados en la Sección 4.5. Al comenzar con la comunicación se observó que la asistencia se inició, ya que el esfuerzo necesario para girar la columna de dirección se vió disminuido significativamente. Para comprobar dicha disminución de manera objetiva se midió el par en la columna tal como se muestra en la figura 6.2 a) y b). Como se observa, cuando la asistencia se encuentra activa (figura 6.2 b)) el medidor de par no muestra ningún valor válido, recuerde que el valor mostrado es sólo el par máximo programado, por lo que el valor de 37Nm no refleja el par medido. Con esto se comprueba que el par se encuentra por debajo de 7.5 Nm, cabe mencionar que sin importar el ángulo de giro de la columna de dirección, el par nunca supera el valor de 7.5 Nm, es decir, la asistencia permanece constante.

Se realizó una comparación del par necesario para virar el eje de la columna de dirección con la asistencia activada y sin ella, retomando los datos de la tabla 6.1, los cuales fueron mediciones del par en la columna sin asistencia. En la figura 6.3 se muestra una comparación de la medición del par en ambas condiciones. Como se puede observar el par cuando hay asistencia es

constante y el par cuando no la hay crece a medida que lo hace el ángulo. Tomando en cuenta un valor de par de  $30.4Nm$ , que es el mayor cuando no hay asistencia, la reducción del par en la columna con la asistencia es de 75.3%.

Como puede observarse en la figura 6.3 el par sin la asistencia activa muestra un comportamiento irregular mostrándose valores máximos y mínimos locales, esto a pesar de que como ya se vió los resortes utilizados presentan un comportamiento lineal. Esto se puede atribuir al hecho de que las piezas empleadas presentaban ya cierto desgaste debido a ser piezas reutilizadas, especialmente el sistema piñón-cremallera, por lo que este desgaste se ve reflejado en su desempeño. A pesar de todo esto se puede destacar que la asistencia es capaz de eliminar estas variaciones en el par manteniendo un esfuerzo menor y constante para el usuario.

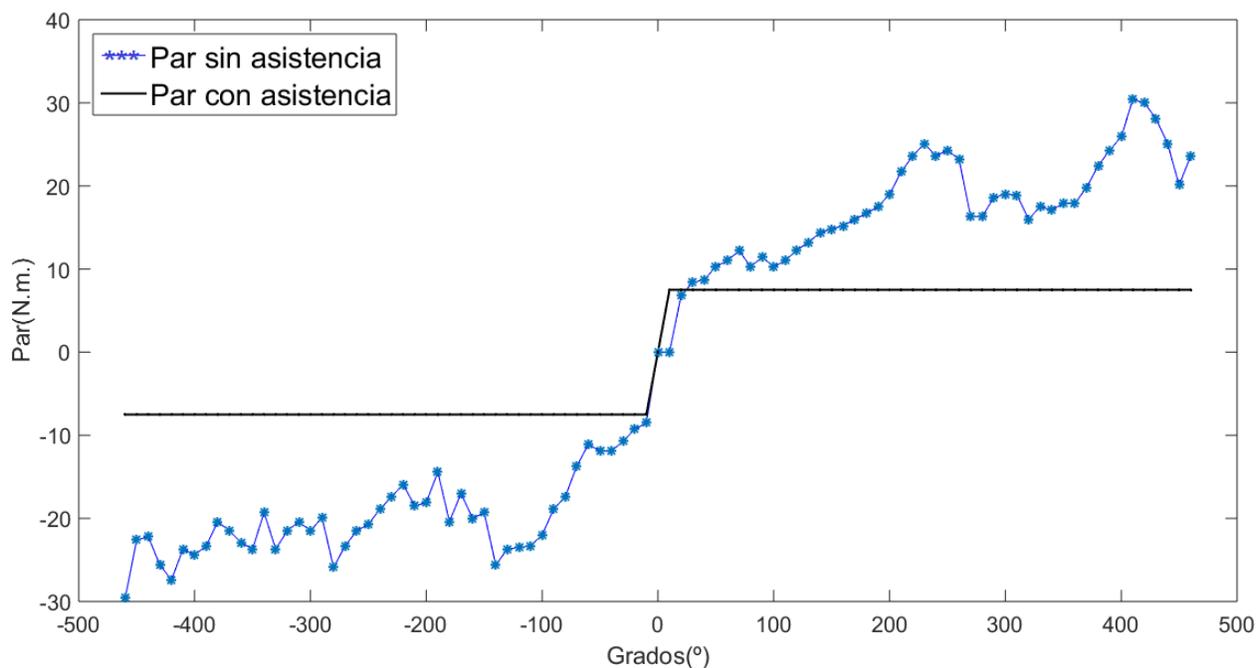


Figura 6.3: Comparación entre el par con y sin asistencia.

Si bien la asistencia pudo activarse en estos experimentos, no es posible conocer con exactitud en ese momento cuales de las tramas eran las que activaban la asistencia. Para ello se decidió hacer pruebas individuales para las tramas más importantes y descubrir con esto la trama específica que logra activar la asistencia.

Para lograr esto se recurrió de nuevo a la simulación en el programa Vehicle Spy<sup>®</sup> en el cual se muestra una columna de información que nos indica la tasa de recepción en milisegundos de cada una de las tramas con su respectivo identificador. Debido a que el sistema de dirección es uno de los más importantes del automóvil dichas tramas tendrán mayor tasa de recepción que en el caso de sistemas menos importantes. Tomando en cuenta esta característica se lograron descartar algunos identificadores, quedando solo los siguientes:

- 110
- 120
- 128
- 140
- 144
- 180
- 280
- 300
- 308
- 320
- 330
- 380
- 388
- 410

Mediante un programa en Python se generaron de la base de datos inicial, archivos de texto individuales agrupando las tramas por identificador; para posteriormente probar cada uno de ellos aplicando los algoritmos 1 y 2 de la Sección 4.5. Haciendo dichas pruebas se demostró que las tramas cuyo identificador es 300 es el que logra activar la asistencia. Durante estas pruebas, se pudo obtener una respuesta favorable por parte de la UCE el cual es la trama: 0x40 0 0 10, que de acuerdo con [75] es una trama comúnmente recibida cuando la comunicación es correcta.

Con la identificación del ID de las tramas que activan la asistencia, fue posible eliminar la interacción entre la computadora y la tarjeta Arduino<sup>®</sup> para la transmisión de las tramas, es decir, tan solo es necesario tomar una trama de la base de datos cuyo ID sea 300 y programar la tarjeta Arduino<sup>®</sup> para que envíe dicha trama a la UCE. Con esto se obtendrán los mismos resultados ya vistos y se activará la asistencia.

## 6.4. Implementación del circuito de acoplamiento

Ya obtenido los resultados de las simulaciones del circuito de acoplamiento del sensor de par, en la Sección 5.3, se construyeron las tarjetas de circuito impreso (PCB) y se realizaron las pruebas de funcionamiento. Se comenzó con los circuitos rectificadores utilizando como operacional el integrado TL084, diodos 1N4004 y resistencias todas de  $1k\Omega$ . Habiendo construido

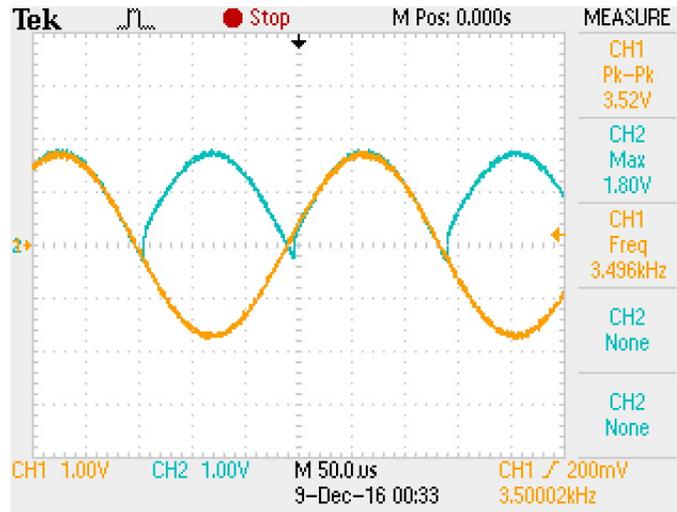


Figura 6.4: Comparativa entre la salida y la entrada del circuito rectificador implementado.

el circuito, se aplicó una señal de prueba a la entrada del rectificador, de  $3.5kHz$  y  $3.5V_{pp}$ , tal como se realizó en la simulación. De este circuito se obtuvieron las señales que se muestra en la figura 6.4. Como puede observarse, se obtienen resultados similares a los de simulación. Como se

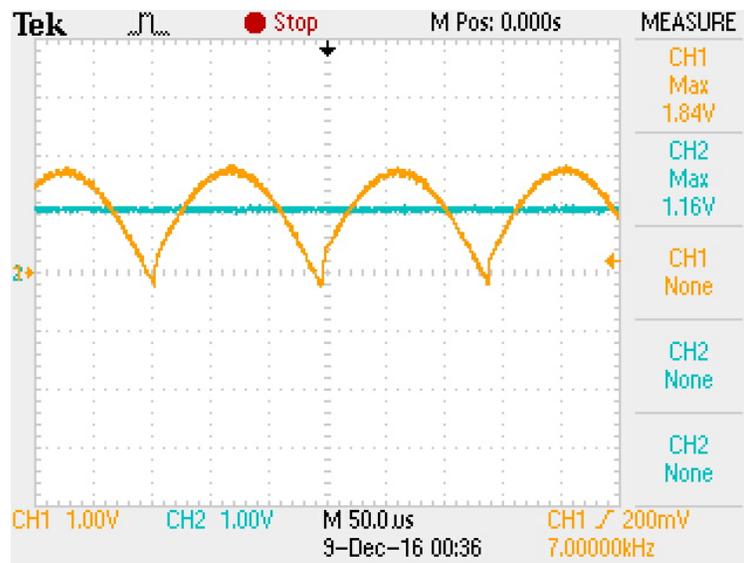


Figura 6.5: Comparativa entre la salida rectificada y después del filtro.

muestra en la figura 6.5 el voltaje llega a volverse negativo sin embargo en el voltaje rectificado y filtrado se obtiene un valor promedio positivo casi constante.

Una vez implementado los rectificadores se pudo agregar la etapa diferenciadora y de amplificación, la cual solo consta del integrado AD620. Posteriormente este circuito se acopló a las bobinas del sensor, introduciendo una señal sinusoidal al puente, de  $3.5V_{pp}$  y  $3.5kHz$ . En la figura 6.6 se muestran los dos voltajes rectificados de las bobinas antes de los filtros, cuando no se le aplica algún par a la columna de dirección. En la figura 6.7 se muestra los voltajes de las bobinas después del filtro RC, antes y después de ser restados por el AD620. Como

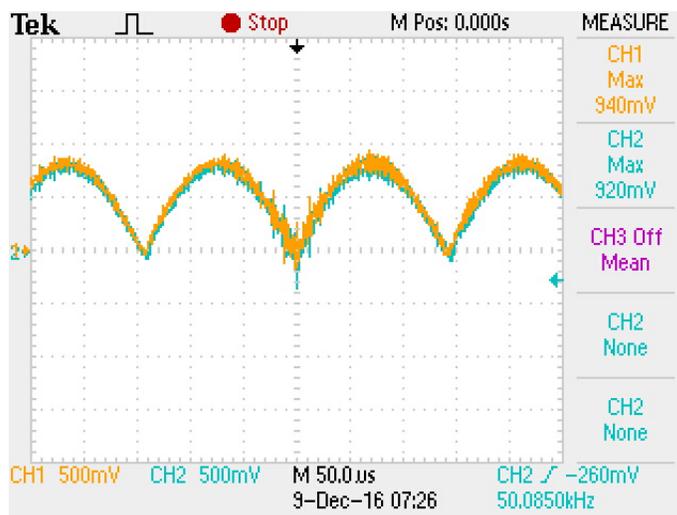


Figura 6.6: Comparativa de las señales rectificadas de la bobina de detección(amarillo) y compensación(azul).

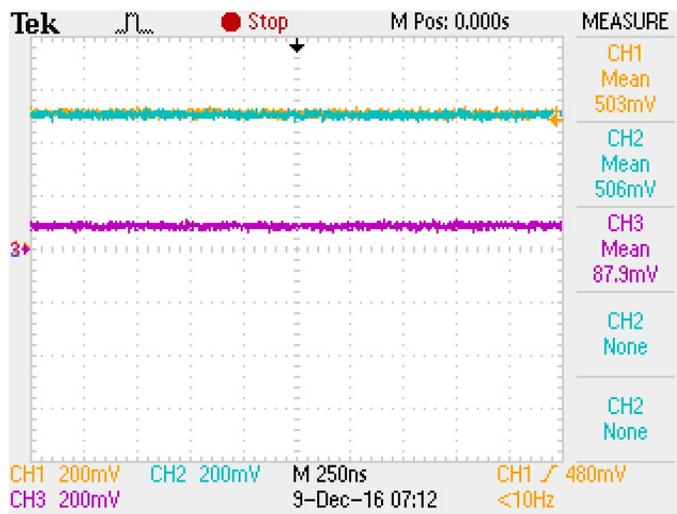


Figura 6.7: Comparación de salida de los dos rectificadores(amarillo y azul) y la salida del AD620(morado) en reposo.

puede apreciarse, el voltaje de la bobina  $L_D$  es de  $506mV$  y el de la bobina  $L_C$  es de  $503mV$ , la diferencia es de  $3mV$ , teóricamente la salida del AD620 debe ser de  $150mV$ , sin embargo es de  $87.9mV$  habiendo un error de  $41.4\%$ , esto se debe a que la diferencia de voltaje es muy pequeña. Al aplicar un par en la columna se observa que se obtiene un error menor puesto que

la diferencia entre las señales es mayor, tal como se observa en la figura 6.8. En este caso la

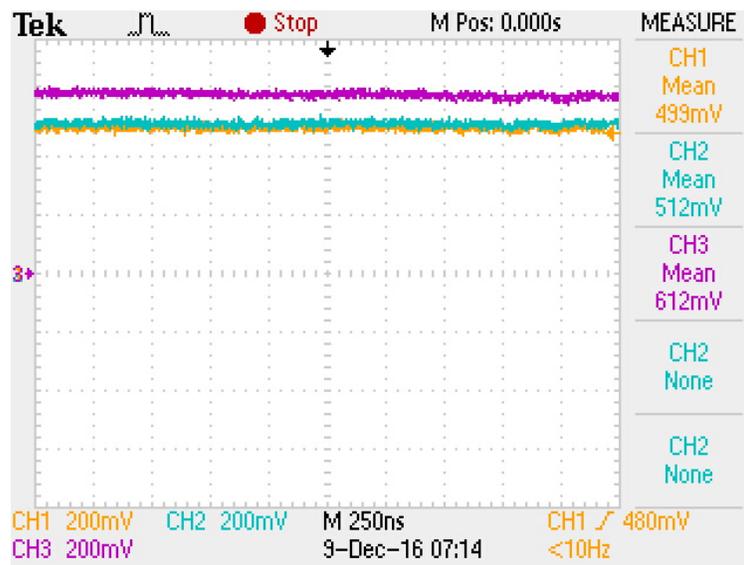


Figura 6.8: Comparación de salida de los dos rectificadores(amarillo y azul) y la salida del AD620(morado) aplicando un par.

diferencia de voltaje entre las señales es de  $13mV$  por lo que la salida del AD620 debería ser de  $650mV$ , en este caso es de  $612mV$  habiendo un error de  $5.8\%$ . Este error puede deberse a la inherente inexactitud que se tiene en la medición de valores tan pequeños.

## 6.5. Caracterización del sensor de par

Una vez implementada todas las etapas de circuito de acondicionamiento de señal del sensor par se procedió a caracterizar dicho sensor. Para ello se utilizó el medidor GearWrench Modelo 85073, aplicando pequeños incrementos de par y midiendo el voltaje de salida del sensor. Se propuso el par positivo en el sentido de las manecillas del reloj y negativo en el sentido contrario, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 6.3 Estos datos fueron ingresados al software Matlab<sup>®</sup> y mediante el procesamiento de los mismos se realizó un ajuste de los puntos del tipo  $y = mx + b$ , obteniéndose la ecuación (6.1), donde  $x$  es el voltaje de salida y  $y$  el par de entrada. En la figura 6.9 se compara los datos obtenido experimentalmente con los datos arrojados por la caracterización del sensor.

$$y = 36.76x - 46.93 \quad (6.1)$$

Tabla 6.3: Resultados de la caracterización del sensor de par

Par(Nm)	Volts	Par(Nm)	Volts	Par(Nm)	Volts	Par(Nm)	Volts
-27.0	0.527	-16.5	0.836	8.0	1.519	18.5	1.787
-26.5	0.551	-16.0	0.843	8.5	1.528	19.0	1.793
-26.0	0.553	-15.5	0.856	9.0	1.544	19.5	1.802
-25.5	0.565	-15.0	0.876	9.5	1.551	20.0	1.820
-25.0	0.582	-14.5	0.888	10.0	1.560	20.5	1.833
-24.5	0.601	-14.0	0.896	10.5	1.581	21.0	1.842
-24.0	0.622	-13.5	0.905	11.0	1.595	21.5	1.846
-23.5	0.622	-13.0	0.926	11.5	1.611	22.0	1.855
-23.0	0.628	-12.5	0.941	12.0	1.626	22.5	1.871
-22.5	0.643	-12.0	0.963	12.5	1.631	23.0	1.886
-22.0	0.653	-11.5	0.977	13.0	1.638	23.5	1.879
-21.5	0.663	-11.0	0.987	13.5	1.656	24.0	1.903
-21.0	0.672	-10.5	1.003	14.0	1.66	24.5	1.911
-20.5	0.714	-10.0	1.019	14.5	1.689	25.0	1.926
-20.0	0.722	-9.5	1.033	15.0	1.705	25.5	1.941
-19.5	0.746	-9.0	1.045	15.5	1.712	26.0	1.956
-19.0	0.774	-8.5	1.050	16.0	1.728	26.5	1.960
-18.5	0.782	-8.0	1.078	16.5	1.740	27.0	1.985
-18.0	0.806	-7.5	1.072	17.0	1.749		
-17.5	0.810	0.0	1.298	17.5	1.756		
-17.0	0.826	7.5	1.504	18.0	1.767		

## 6.6. Caracterización del motor de CD de la DAE

Como se ha visto, la DAE cuenta con un motor de CD de imanes permanentes y un voltaje de alimentación de 12 V. Para el propósito de poder aplicar en la plataforma algoritmos de control propios, es necesario conocer las características eléctricas y mecánicas del motor, tales como la inductancia(L), resistencia(R), constante eléctrica(K), coeficiente de fricción viscosa (B) y el momento de inercia(J).

$$L \frac{di}{dt} = V - Ri - Kw \quad (6.2)$$

$$J \frac{dw}{dt} = Ki - Bw \quad (6.3)$$

El diagrama equivalente del motor de CD se muestra en la figura 6.10, y las ecuaciones que describen su dinámica son la (6.2) y (6.3). La resistencia de armadura se obtuvo midiéndola directamente en las terminales del motor utilizando un multímetro, y cuyo valor es de  $0.7\Omega$ . Para determinar la inductancia de armadura se utilizó el medidor Synthesized In-circuit LCR/EESR Meter Modelo 886 de la marca BK PRECISIÓN<sup>®</sup>, que en este caso arrojó un valor de  $6.01mH$ .

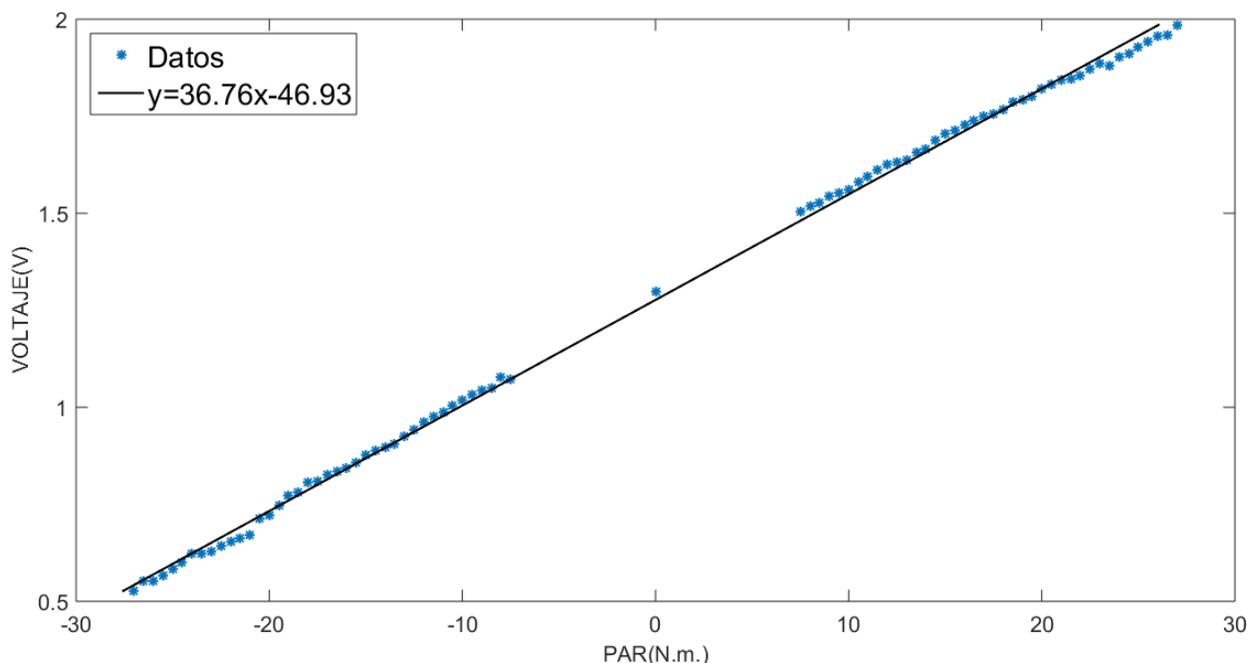


Figura 6.9: Gráfica de la función obtenida de la caracterización de la señal del sensor de par.

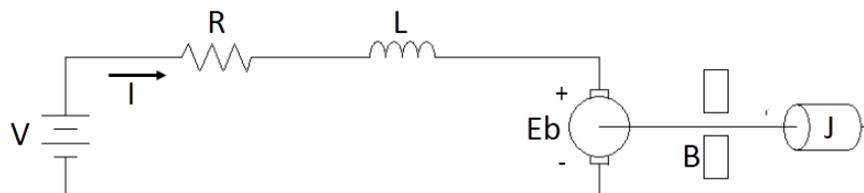


Figura 6.10: Diagrama equivalente del motor de CD.

Suponiendo el motor en estado estacionario, es decir, cuando la corriente que fluye no varía en el tiempo, al igual que la velocidad angular, se puede asumir que las derivadas de dichas variables son cero, por lo que de las ecuaciones (6.2) y (6.3) se reducen a

$$K = \frac{V - Ri}{\omega}$$

$$B = \frac{Ki}{\omega}$$

Por lo tanto para poder conocer el valor de la constante  $K$  debemos conocer el valor de la corriente, el voltaje aplicado y la velocidad angular. Se aplicaron niveles de voltaje al motor, los cuales se fueron aumentando gradualmente y mediante un multímetro se midió la corriente en el motor, finalmente la velocidad angular fue medida con el tacómetro de no contacto Pocket Tach de la marca Extech<sup>®</sup>, tal como se observa en la figura 6.11. Con estas mediciones se pudo construir la tabla 6.4.

Obtenido los datos, se calculó un promedio de las constantes  $K = 0.0372$  y  $B = 3.687 \times 10^{-4} \frac{Nm}{s \cdot rad}$ . El valor numérico de  $K$  corresponde a las dos constante del motor ( $K_i$  y  $K_e$ ) pero



Figura 6.11: Caracterización del motor de CD.

las unidades en las que se expresan son distintas,  $\frac{Nm}{A}$  y  $Vs$  respectivamente. Finalmente, para obtener el valor de la inercia del rotor, se procedió a desarmar el motor y obtener las dimensiones del rotor y su peso, para posteriormente construir su modelo CAD en Solid Works<sup>®</sup>, veáse figura 6.12, tal que pudiera obtenerse el momento de inercia a través de de propiedades físicas del modelo. El peso del rotor es de 1.045Kg, y su momento de inercia calculado de esta manera



Figura 6.12: Modelo del rotor.

es de  $3.125 \times 10^{-4} Kg m^2$ .

Puede resumirse las características del motor en la tabla 6.5 Con esto se finaliza el proceso de caracterización del motor de CD y de la plataforma de dirección asistida eléctrica.

Tabla 6.4: Medición de la corriente, velocidad angular y voltaje en el motor en estado estacionario

Voltaje(V)	Corriente(A)	Velocidad(rad/s)	K	B(Nms/rad)x10 <sup>-4</sup>
1	0.62	14.05	0.0343	17
2	0.78	40.14	0.0352	6.8472
3	0.92	66.15	0.0349	4.8560
4	0.99	88.10	0.0370	4.1548
5	1.08	111.89	0.0374	3.6143
6	1.18	136.66	0.0374	3.2313
7	1.27	161.43	0.0375	2.9470
8	1.36	185.25	0.0377	2.7659
9	1.43	209.61	0.0378	2.5800
10	1.52	235.38	0.0376	2.4306
11	1.63	260.04	0.0376	2.3569
12	1.69	285.19	0.0376	2.2300
13	1.78	308.20	0.0378	2.1859
14	1.88	333.68	0.0377	2.1257
15	1.98	357.72	0.0378	2.0912
16	2.12	380.06	0.0379	2.1148
17	2.23	405.02	0.0378	2.0836
18	2.36	429.11	0.0378	2.0801
19	2.55	450.67	0.0379	2.1453
20	2.95	471.81	0.0377	2.3572

Tabla 6.5: Constantes del motor de CD de la marca Koyo®

Constante	Valor
L	6.01mH
R	0.7Ω
$K_e$	0.0372 Vs
$K_i$	0.0372 $\frac{Nm}{A}$
J	3.125x10 <sup>-4</sup> Kgm <sup>2</sup>
B	3.687x10 <sup>-4</sup> $\frac{Nms}{rad}$



# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajo futuro

Esta tesis tuvo como objetivo el desarrollo de una plataforma de dirección asistida eléctrica automotriz que permitiera apreciar el funcionamiento de dicho sistema. La plataforma construída permite emular la fuerza de resistencia en los neumáticos durante el viraje. En la construcción de la plataforma, uno de los principales problemas que se presentó fue el acoplamiento de la columna de dirección y el mecanismo piñón-cremallera, esto debido a que pertenecían a modelos de automóviles diferentes. El problema se solucionó realizando una adaptación de los ejes de los dos mecanismos mediante un proceso de soldado y torneado. Otro aspecto importante en la construcción de la plataforma fue el mecanismo de emulación de la fuerza de los neumáticos, ya que era necesario y se logró conseguir un mecanismo funcional y de tamaño reducido. Para ello fue primordial realizar un diseño de resorte que cumpliera principalmente con el desplazamiento y fuerza necesarios en el mecanismo piñón-cremallera. Para encontrar un resorte que cumpliera con las especificaciones del diseño se caracterizaron tres resortes comerciales y se eligió el más cercano a las características deseadas.

Posterior a la construcción de la plataforma, se realizó la comunicación con la DAE. Para lograr esto fue necesario investigar y conocer además del diagrama eléctrico del bus CAN y el de alimentación de la DAE, el protocolo estándar de comunicación que este sistema utiliza. Esta investigación se dificultó debido a que el sistema es de arquitectura cerrada, por tal razón fue necesario adquirir un manual de reparación del automóvil Pontiac G5. En el se pudo consultar estos y otros aspectos importantes del sistema DAE y mediante un software especializado en diagnóstico del automóvil se pudieron obtener las tramas que circulan normalmente por el bus de comunicación CAN.

Habiendo solucionado estos puntos en relación a la comunicación con la DAE, fue posible activar la asistencia en el sistema mediante el uso de un módulo controlador de protocolo CAN. La activación de la asistencia se comprobó inicialmente por inspección del esfuerzo físico al momento de virar el eje de la columna de dirección, ya que éste se ve reducido cuando la asistencia está presente. Esto se comprobó de manera más objetiva, con un medidor de par en la columna con y sin la asistencia presente. Se comprobó que el par de asistencia permite mover la columna sin importar el par de oposición que se presenta por parte del mecanismo de emulación de fuerza de los neumáticos, sin un mayor esfuerzo. No hubiese sido posible activar la asistencia si no se hubiesen identificado las tramas de comunicación apropiadas.

Otro objetivo importante que se logró durante la realización de este trabajo, fue la obtención de las señales de corriente del motor y par en la columna de dirección. Para acceder a la señal de corriente, se recurrió un sensor colocado en el cable de alimentación del motor. El principal problema fue la obtención de la señal de par, ya que fue necesario detectar las variaciones de impedancia de las bobinas de detección y compensación. Pese a que se logró obtener una señal de voltaje asociado a esta variación, dicho voltaje es muy pequeño por lo que su tratamiento es más complejo. Fue necesario utilizar un amplificador de instrumentación, comúnmente utilizado en el tratamiento de señales bioeléctricas, y con el cual se obtuvo una señal más tratable. El ruido presente en la señal fue atenuado a través de un filtro analógico simple de primer orden que dio buen resultado. Como parte final del acondicionamiento de señal los niveles de voltaje fueron escalados apropiadamente para evitar cualquier riesgo de daño en el equipo de adquisición por voltajes muy grandes o negativos.

El finalizar este trabajo de tesis, se obtuvo una plataforma de dirección asistida eléctrica, capaz de emular las condiciones presentes en un automóvil, es decir, una fuerza de resistencia y las señales necesarias para que este sistema funcione. Además fue posible poner a disposición del usuario las señales de par y corriente del motor, esto con el objetivo principal de que pueda aplicar leyes de control y curvas de asistencias propios. Esta plataforma permite también realizar pruebas demostrativas con fines académicos del funcionamiento de este sistema del automóvil actual.

Como se vio en los resultados obtenidos de este trabajo la DAE comercial que se empleó necesita de las señales de comunicación específicas para su operación, tomando en cuenta el protocolo de comunicación y la información que se envíe, para que su funcionamiento sea el adecuado, el cual en este caso se logró, pero si se pretende variar aun más los parámetros de asistencia y regímenes de operación es necesario contar con el automóvil, para poder obtener y averiguar más sobre los datos que viajan por el bus de comunicación para así modificar estos regímenes.

Considerando el trabajo desarrollado en esta tesis y las pruebas que se realizaron, se proponen como tareas futuras siguientes:

- Realizar pruebas en los resortes empleados con el objetivo de conocer el tiempo de vida útil.
- Desarrollar y adaptar un sistema activo de emulación de fuerza de los neumáticos, esto permitirá variar la fuerza aplicada en un rango mayor.
- Diseñar y aplicar una ley de control, con el objetivo de poder establecer un par de asistencia específico en el motor eléctrico.
- Diseñar curvas de asistencia para diferentes regímenes, tomando en cuenta el confort del usuario, y el esfuerzo físico realizado.

# Apéndice A

## Gráficas y tablas utilizadas para la selección del resorte

Tabla A.1: Tabla de los aceros típicos utilizados en el diseño de resortes (tomado de [54]).

Tipo de material	Núm. ASTM	Costo relativo	Límites de temperatura, °F
<i>A. Aceros al alto carbón</i>			
Estirado en frío	A227	1.0	0-250
Acero de uso general, con 0.60 a 0.75 % de carbón; bajo costo			
Alambre para instrumentos musicales	A228	2.6	0-250
Acero de alta calidad con 0.80 a 0.95 % de carbón; muy alta resistencia; excelente acabo superficial; estirado en frío; buen funcionamiento en fatiga; se usa principalmente en tamaños pequeños, hasta de 0.125 pulg			
Templado en aceite	A229	1.3	0-350
Acero de propósito general, con 0.60 a 0.70 % de carbón; se usa principalmente en tamaños mayores que 0.125 pulg; no es bueno para choque o impacto			
<i>B. Aceros aleados</i>			
Cromo-vanadio	A231	3.1	0-425
Buena resistencia a la fatiga, resistencia al impacto, funcionamiento en alta temperatura; calidad de resorte de válvula			
Cromo-silicio	A401	4.0	0-475
Resistencia muy alta y buena resistencia a la fatiga y al choque			
<i>C. Aceros inoxidables</i>			
Tipo 302	A313(302)	7.6	0-550
Muy buena resistencia a la corrosión y para el funcionamiento a alta temperatura; casi no magnético; estirado en frío; los tipos 304 y 316 también están en esta clase ASTM y tiene mejor facilidad de conformación, pero su resistencia es menor			
Tipo 17-7 PH	A313(631)	11.0	0-600
Buen funcionamiento a alta temperatura			

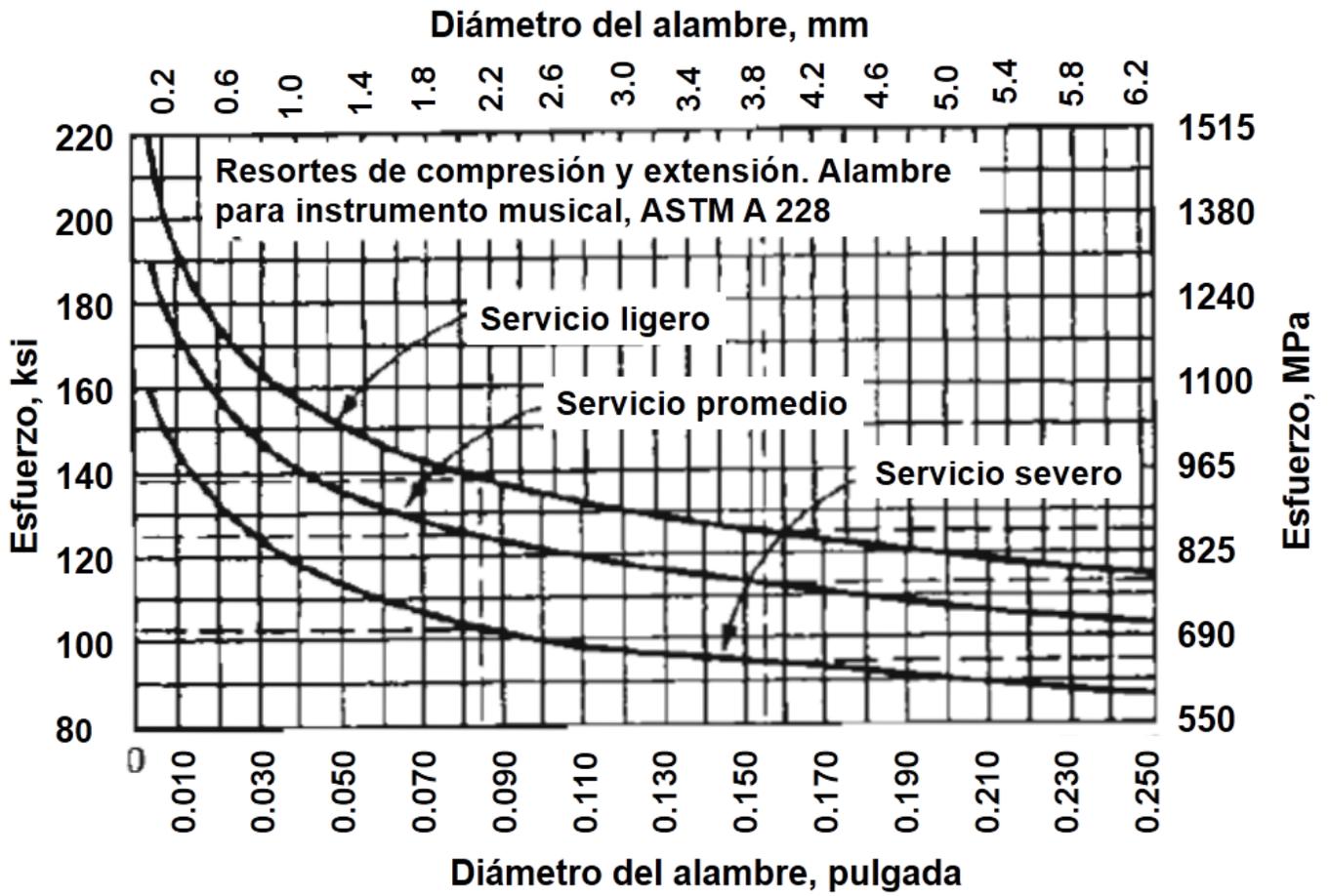


Figura A.1: Gráfica de cálculo de calibre de alambre (tomado de [54]).

Tabla A.2: Parámetros de cortante G de los aceros(tomado de [54] ).

Material ASTM núm.	Módulo en cortante, G		Módulo en tensión, E	
	(psi)	(GPa)	(psi)	(Gpa)
Acero estirado en frío: A227	$11.5 \times 10^6$	79.3	$28.6 \times 10^6$	197
Alambre para instrumentos musicales:A228	$11.85 \times 10^6$	81.7	$29.0 \times 10^6$	200
Templado en aceite:A229	$11.2 \times 10^6$	77.2	$28.5 \times 10^6$	196
Al cromo-vanadio:A-231	$11.2 \times 10^6$	77.2	$28.5 \times 10^6$	196
Al cromo-silicio	$11.2 \times 10^6$	77.2	$29.5 \times 10^6$	203
Aceros inoxidables: A313				
Tipos 302, 304, 316	$10.0 \times 10^6$	69.0	$28.0 \times 10^6$	193
Tipo 17-7 PH	$10.5 \times 10^6$	72.4	$29.5 \times 10^6$	203
Latón de resortes: B134	$5.0 \times 10^6$	34.5	$15.0 \times 10^6$	103
Bronce fosforado: B159	$6.0 \times 10^6$	41.4	$15.0 \times 10^6$	103
Cobre al berilio: B197	$7.0 \times 10^6$	48.3	$17.0 \times 10^6$	117
Monel y K-Monel	$9.5 \times 10^6$	65.5	$26.0 \times 10^6$	179
Inconel e Inconel-X	$10.5 \times 10^6$	72.4	$31.0 \times 10^6$	214



## Apéndice B

Tablas para el análisis del cordón de soldadura

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de $G$	Segundo momento unitario del área
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$

Figura B.1: Propiedades a la flexión de las soldaduras de filete (tomado de [76]).

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento polar unitario del área
	$A = 0.70 hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
	$A = 1.41 hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b+d)}$	$J_u = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b+d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b+d}$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b+d)^3}{6}$
	$A = 1.414 \pi hr$		$J_u = 2\pi r^3$

\*G es el centroide del grupo de soldaduras; h es el tamaño de la soldadura; el plano del par de torsión está en el plano de la página; todas las soldaduras son de ancho unitario.

Figura B.2: Propiedades a la torsión de las soldaduras de filete(tomado de [76]).

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

\*Sistema de numeración del código de especificaciones de la American Welding Society (AWS) para electrodos. En este sistema se usa como prefijo la letra E, en un sistema de numeración de cuatro o cinco dígitos en el cual los primeros dos o tres números designan la resistencia aproximada a la tensión. El último dígito incluye variables en la técnica de soldadura, como la fuente de corriente. El penúltimo dígito indica la posición de la soldadura, por ejemplo, plana, vertical o sobre la cabeza. El conjunto completo de especificaciones se puede obtener solicitándolo a la AWS.

Figura B.3: Propiedades mínimas del metal de soldadura (tomado de [76]).

# Apéndice C

## Resultados de la caracterización de los resortes

En este apéndice se muestran los resultados experimentales obtenidos de la caracterización de los resortes propuestos para el mecanismo de emulación de fuerza. En cada una de las tablas se muestra una columna de la cantidad de fuerza en extensión aplicada a los resortes y le corresponde una columna de deformación que este presentaba.

Tabla C.1: Resultados del resorte A.

Fuerza [N]	Deformación [mm]	Fuerza [N]	Deformación [mm]
0	0	360	24.31
40	0.20	400	28.03
80	0.23	440	34.24
120	0.84	480	38.24
160	1.20	520	44.40
200	3.95	560	51.04
240	7.68	600	63.69
280	14.15	640	74.65
320	17.88	680	88.86

Tabla C.2: Resultados del resorte B.

Fuerza [N]	Deformación [mm]	Fuerza [N]	Deformación [mm]
0	0	360	58.87
40	0.50	400	70.22
80	1.48	440	81.48
120	2.70	480	93.20
160	5.12	520	105.87
200	13.72	560	119.68
240	24.91		
280	36.16		
320	47.61		

Tabla C.3: Resultados del resorte C.

Fuerza [N]	Deformación [mm]	Fuerza [N]	Deformación [mm]
0	0	440	33.07
40	0.35	480	38.27
80	0.57	520	43.48
120	1.08	560	48.70
160	1.82	600	53.87
200	3.28	640	59.05
240	7.14	680	64.25
280	12.28	720	69.50
320	17.44	760	74.64
360	22.65	800	79.85
400	27.86		

# Apéndice D

## Análisis del amplificador de precisión

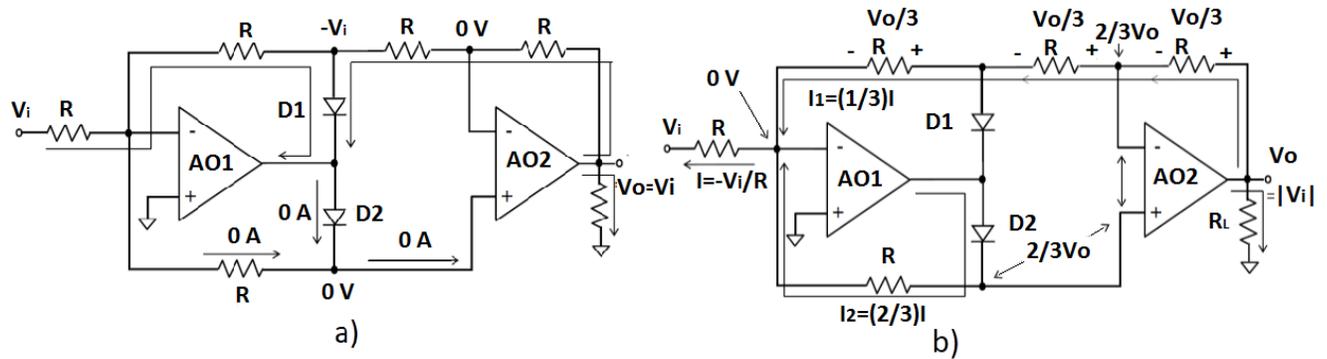


Figura D.1: Rectificador de precisión ante entrada positiva(a) y entrada negativa(b) (tomado de [71]).

De acuerdo con [71], durante el semiciclo positivo(veáse figura D.1 a)) D1 conduce y D2 entra en corte ya que tiene un voltaje de 0v en el cátodo, además de que en el ánodo tiene aplicados  $-V_i - 0.6V$  debido a la conducción de D1. Al conducir D1 hace que  $AO_1$  se convierta en un amplificador inversor. Debido a que en el cátodo de D2 el voltaje es 0 entonces el voltaje en la entrada no inversora de  $AO_2$  es cero y por lo tanto también en su entrada inversora, esto lo convierte en un amplificador inversor volviendo al signo positivo la entrada  $V_i$ . En el semiciclo negativo(veáse figura D.1 b)) la corriente  $I$  proviene de las ramas superiores e inferiores  $I = I_1 + I_2$  donde  $I_1 = \frac{V_o}{3R}$  e  $I_2 = \frac{(2V_o)}{3R}$  por lo tanto

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V_o}{3R} + \frac{2V_o}{3R} = \frac{V_o}{R} \quad (D.1)$$

Debido a que también  $I = -\frac{V_i}{R}$  se deduce lo siguiente:

$$\frac{V_o}{R} = -\frac{V_i}{R} \therefore V_o = -V_i$$

Con este análisis se demuestra que salida de la señal de entrada es su valor absoluto.



# Apéndice E

## Análisis del circuito sumador

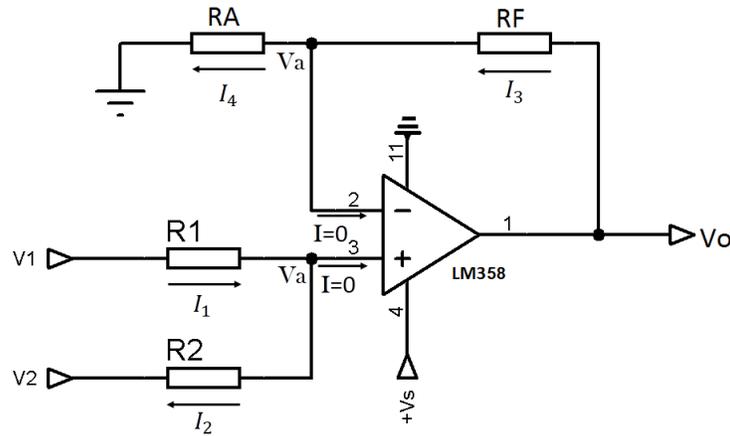


Figura E.1: Amplificador operacional en su configuración de sumador no inversor.

Para obtener el voltaje  $V_o$  del sumador, suponemos un amplificador ideal y que por lo tanto el voltaje en el terminal inversor y no inversor es el mismo, y que el flujo de la corriente hacia estos mismos es cero (véase [77]). Tomando en cuenta esto, podemos suponer los sentidos de las corrientes y el voltaje  $V_a$  tal como se muestra en la figura E.1. Por lo tanto se pueden establecer las siguientes ecuaciones

$$I_1 = I_2 \quad (\text{E.1})$$

$$I_3 = I_4 \quad (\text{E.2})$$

De la ecuación (E.1) es posible deducir que

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_2}{R_2}$$

Y despejando  $V_a$  se obtiene la ecuación siguiente

$$V_a = \frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2} \quad (\text{E.3})$$

De la ecuación (E.2) es posible establecer que

$$\frac{V_o - V_a}{R_F} = \frac{V_a}{R_A}$$

Y podemos despejar  $V_a$ , obteniéndose lo siguiente

$$V_a = \frac{V_o R_A}{R_A + R_F} \quad (\text{E.4})$$

Igualando las ecuaciones (E.3) y (E.4) y despejando  $V_o$ , se obtiene

$$V_o = \frac{R_A + R_F}{R_A(R_1 + R_2)}(V_1 R_2 + V_2 R_1) \quad (\text{E.5})$$

Proponiendo resistencias iguales, se obtiene

$$V_o = V_1 + V_2 \quad (\text{E.6})$$

Con esto se comprueba que esta configuración permite sumar dos voltajes de entrada.

# Apéndice F

## Código fuente de los algoritmos empleados

El código de la tarjeta Arduino® para la comunicación con la DAE y Python se muestra a continuación:

```
1 #include <mcp_can.h>
2 #include <SPI.h>
3 /** Variables para la comunicación serial con Python**/
4 INT32U canID = 0x000;
5 String mens;
6 boolean a=false;
7 int len , k=0,i=0 ;
8 unsigned numdat=0;
9 unsigned char *stm;
10 /** Variables para la comunicación CAN con la UCE**/
11 const int SPI_CS_PIN = 9;
12 MCP_CAN CAN(SPI_CS_PIN);
13 INT32U canIDECU=0x000;
14 unsigned char CAN_recib = 0, tam = 0, CAN_buf[8];
15 void setup()
16 {
17     //Se inicia la comunicación serial y la comunicación CAN
18     Serial.begin(57600);
19     START_INIT:
20     if(CAN_OK == CAN.begin(CAN_500KBPS))
21     {
22         Serial.println("CAN_BUS_Shield_iniciado");
23     }
24     else
25     {
26         Serial.println("CAN_BUS_Shield_fallo_inicio");
27         Serial.println("Inicio_CAN_BUS_Shield_de_nuevo");
28         delay(100);
29         goto START_INIT;
30     }
31     Serial.println("Comunicándose...");
32     attachInterrupt(0, Recibir, FALLING); //Se activa la interrupción cada vez que
        se recibe un dato por CAN
33 }
34 void Recibir()
35 {
36     CAN_recib = 1;
```

```

37 }
38 void serialEvent() //Evento que se encarga de recibir los mensajes provenientes
    de Python
39 {
40   while (Serial.available())
41   {
42     char x= Serial.read(); //leemos solo un byte de toda la información
43     if(x=='\n')
44     {
45       numdat++;
46     }
47     mens+=x;
48   }
49 }
50 void loop()
51 {
52   len=mens.length();
53   while (!Serial.available())
54   {
55     //Python esta leyendo datos enviados
56   }
57   //A continuación se convierte el mensaje recibido de Python a un mensaje en
    hexadecimal
58   //tomando en cuenta que se trata de un mensaje string de la forma: 380,2,1A
    ,0,0,E0,0,FC,0
59   i=0;
60   stm=new unsigned char[numdat];
61   for (k=0;k<=len-2;k++)
62   {
63     if(k<=2)
64     {
65       switch(k)
66       {
67         case 0:
68           if (mens[k]>=0x41) //valores ABCDEF
69           {
70             canID+=((mens[k]-0x37)*0x100);
71           }
72           else //valores 0-9
73           {
74             canID+=((mens[k]-0x30)*0x100);
75           }
76           break;
77         case 1:
78           if (mens[k]>=0x41) //valores ABCDEF
79           {
80             canID+=((mens[k]-0x37)*0x10);
81           }
82           else //valores 0-9
83           {
84             canID+=((mens[k]-0x30)*0x10);
85           }
86           break;
87         case 2:
88           if (mens[k]>=0x41) //valores ABCDEF

```

```

89         {
90             canID+=(mens[k]-0x37);
91         }
92     else //valores 0-9
93     {
94         canID+=(mens[k]-0x30);
95     }
96     break;
97 }
98 }
99 else
100 {
101     if (mens[k]!=' ','') // Si no es una coma
102     {
103         if (mens[k+1]!=' ','&& mens[k+1]!='\n')
104         {
105             if (mens[k]>=0x41) //valores ABCDEF
106             {
107                 stm[i]=((mens[k]-0x37)*0x10);
108                 //stm[i]=(mens[k]-55)*16);
109             }
110             else //valores 0-9
111             {
112                 stm[i]=((mens[k]-0x30)*0x10);
113                 //stm[i]=(mens[k]-48)*16);
114             }
115             if (mens[k+1]>=0x41) //valores ABCDEF
116             {
117                 stm[i]+=(mens[k+1]-0x37);
118                 //stm[i]+=(mens[k+1]-55);
119             }
120             else //valores 0-9
121             {
122                 stm[i]+=(mens[k+1]-0x30);
123                 //stm[i]+=(mens[k+1]-48);
124             }
125             k+=1;
126             i++;
127         }
128     }
129     else
130     {
131         if (mens[k]>=0x41) //valores ABCDEF
132         {
133             stm[i]=(mens[k]-0x37);
134             //stm[i]=(mens[k]-55);
135         }
136         else //valores 0-9
137         {
138             stm[i]=(mens[k]-0x30);
139             //stm[i]=(mens[k]-48);
140         }
141         i++;
142     }
143 }

```

```

144 }
145 CAN.sendMessageBuf(canID, 0, numdat, stm); //Enviamos la trama en hexadecimal a la
      UCE
146 delete(stm);
147 numdat=0;
148 canID=0x000;
149 mens="";
150 delay(5);
151 if(CAN_recib) //Se reciben los datos provenientes del bus CAN y se envía a
      Python vía serial
152 {
153     CAN_recib = 0;
154     Serial.println("_____");
155     canIDECU = CAN.getCanId();
156     while (CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())
157     {
158         CAN.readMsgBuf(&tam, CAN_buf);
159         Serial.print(canIDECU,HEX);
160         Serial.print(":\n");
161         for(i=0; i<tam; i++)
162         {
163             Serial.print(CAN_buf[i],HEX);
164         }
165         Serial.println();
166     }
167 }
168 Serial.flush();
169 }

```

Acontinuación se muestra el código en lenguaje Python para la comunicación con la tarjeta Arduino®

```

1 import argparse
2 import os
3 import time
4 import sys
5
6 try:
7     import serial
8     PuertoSerie = serial.Serial('COM3',57600,timeout=1,bytesize = serial.
      EIGHTBITS)
9     #Es posible que el numero de puerto COM cambie de acuerdo a la tarjeta
      Arduino
10 except (ImportError, serial.SerialException):
11     PuertoSerie.close()
12 while True:
13     try:
14         archivo=open("C:\Users\MEOSIA_I\Desktop\GMLAN_CODIGOS\GMLAN_FRAMES2.txt"
      ,"r")
15         # La ruta y el nombre pueden cambiar de acuerdo a la localización del
      archivo
16         for linea in archivo.readlines():
17             PuertoSerie.write(linea)
18             time.sleep(0.005)
19             PuertoSerie.flush()

```

```

20         if (PuertoSerie.inWaiting() > 0):
21             Arduino = PuertoSerie.readline()
22             print Arduino
23             PuertoSerie.flush()
24
25         break
26     except KeyboardInterrupt:
27         print ("Exiting")
28         PuertoSerie.close()
29         break
30 print ("Exiting")
31 PuertoSerie.close()

```

El código que se muestra a continuación es el empleado para la comunicación con la UCE omitiendo la interacción con Python, enviando una sola trama con ID de 300 y con el cual se obtienen los mismos resultados que al aplicar los dos códigos anteriores.

```

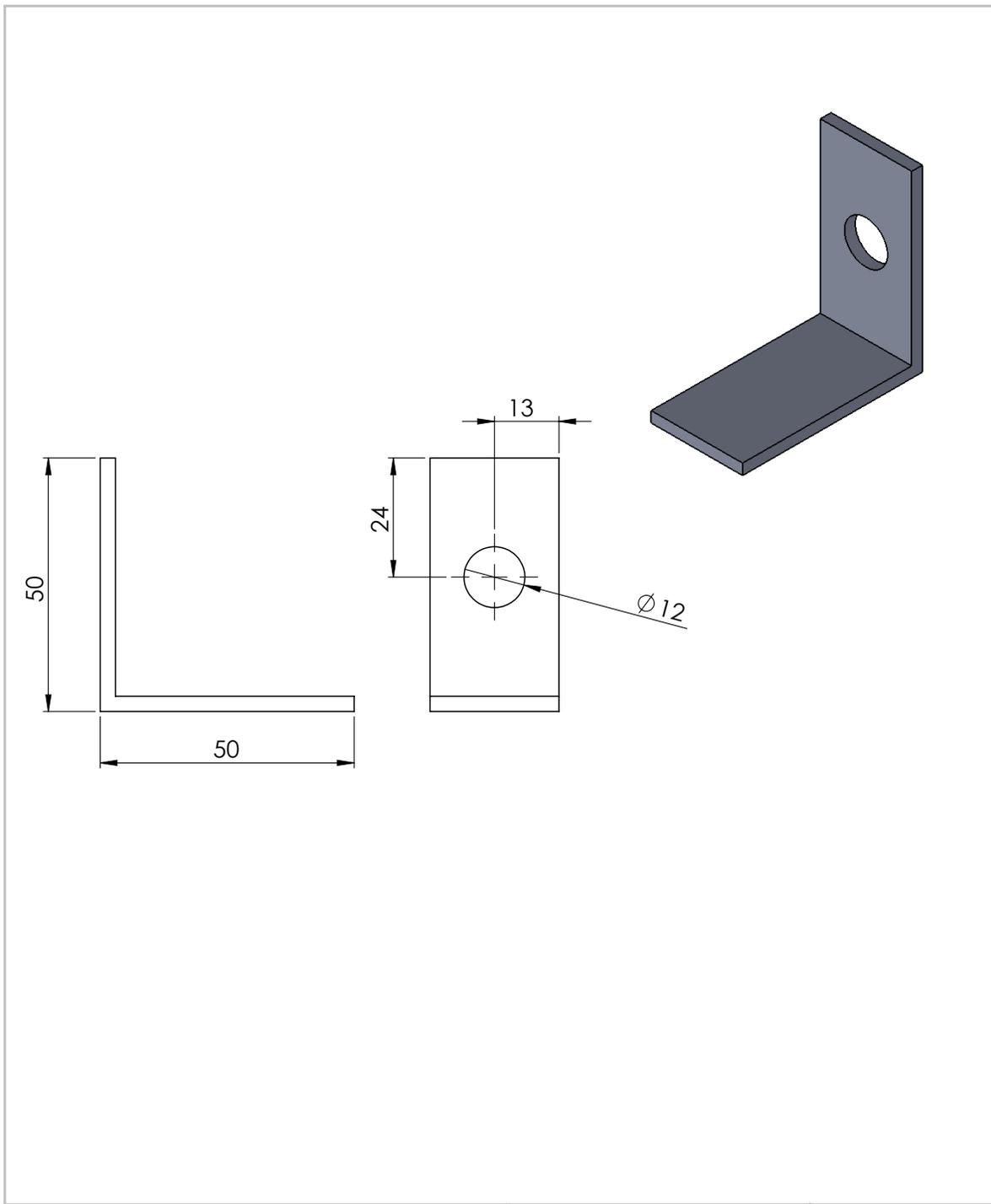
1 #include <SPI.h>
2 #include <stdio.h>
3 #include <mcp_can.h>
4 #include <stdlib.h>
5
6 //variables para la comunicación CAN con la UCE
7 const int SPI_CS_PIN = 9;
8 MCP_CAN CAN(SPI_CS_PIN);
9 INT32U canId = 0x000;
10 unsigned char b_recib = 0;
11 unsigned char len = 0;
12 unsigned char buf[8];
13 unsigned char OBD[8] = {0x0, 0x1, 0x9, 0xDB, 0xDF, 0x0, 0x0, 0x0};
14 void setup()
15 {
16     Serial.begin(115200);
17 START_INIT:
18
19     if (CAN_OK == CAN.begin(CAN_500KBPS))
20     {
21         Serial.println("CAN_BUS_Shield_iniciado");
22     }
23     else
24     {
25         Serial.println("CAN_BUS_Shield_inicio_fallido");
26         Serial.println("Inicio_CAN_BUS_Shield_de_nuevo");
27         delay(100);
28         goto START_INIT;
29     }
30     Serial.println("Comunicandose...");
31     attachInterrupt(0, Recibir, FALLING); //Se activa la interrupción simple que
        se reciba un mensaje CAN
32 }
33 void Recibir()
34 {
35     b_recib = 1;
36 }
37 void loop()

```

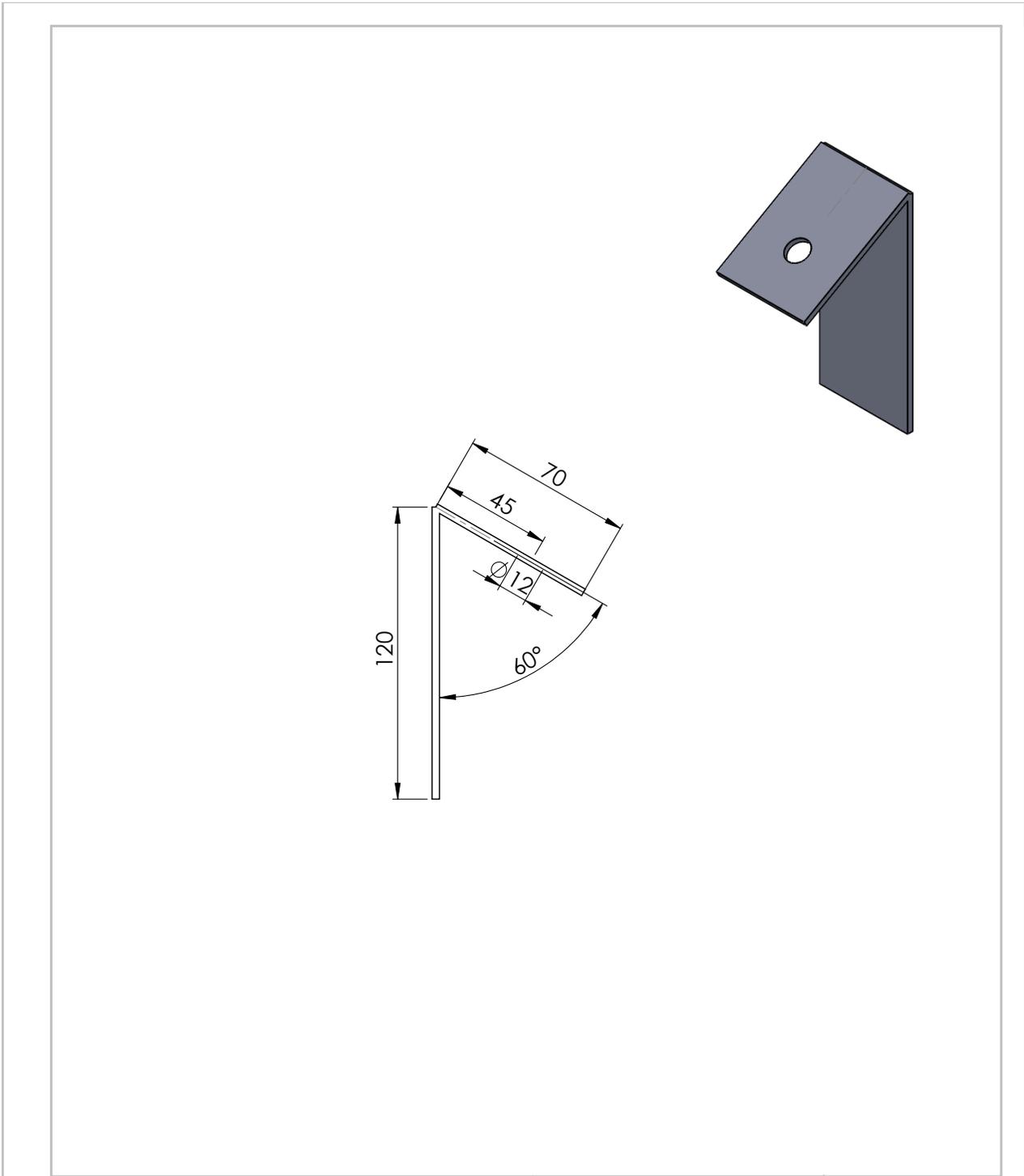
```
38 {
39   if(b_recib)
40   {
41     b_recib = 0;
42     Serial.println("_____");
43     canId = CAN.getCanId();
44     while (CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive()) //Se recibe el mensaje CAN de
         la UCE
45     {
46       CAN.readMsgBuf(&len, buf);
47
48     }
49     CAN.sendMsgBuf(0x300,0, 8, OBD); //Se envía la trama a la UCE
50     delay(50);
51   }
52 }
```

# Apéndice G

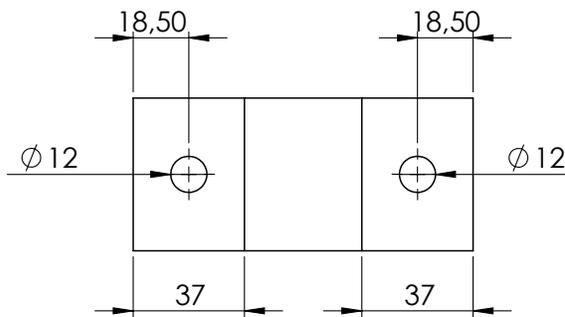
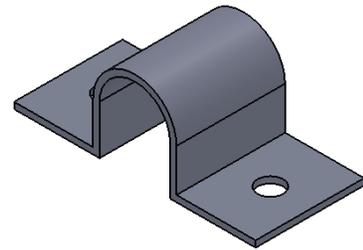
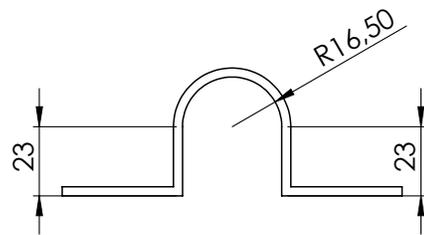
## Dibujos técnicos



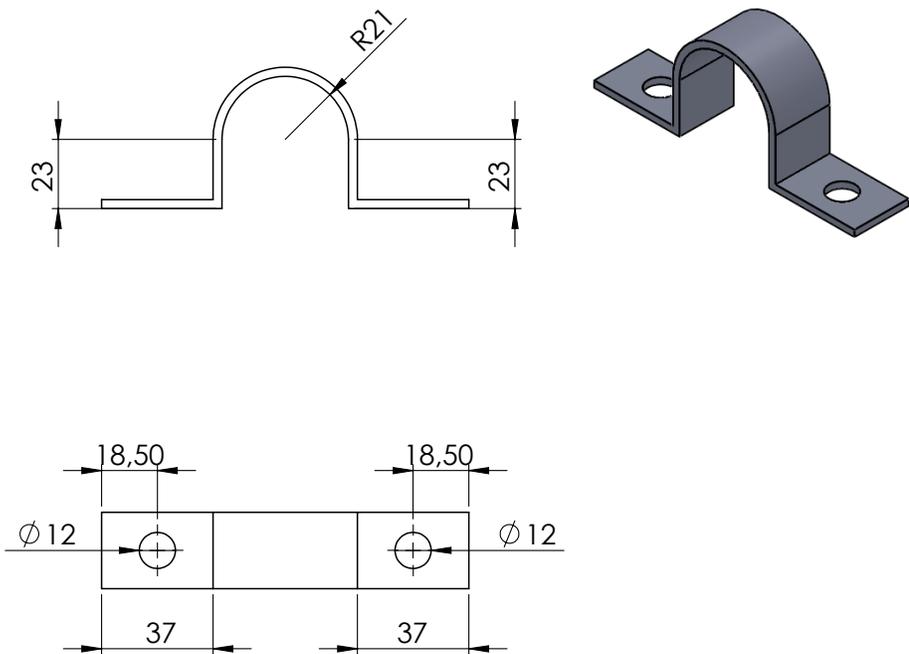
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 1x1/8"	CANTIDAD 10 cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO:  <b>Sujetador estructural</b>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A-36</b>	N.º DE DIBUJO <b>SE</b>	<b>A4</b>
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



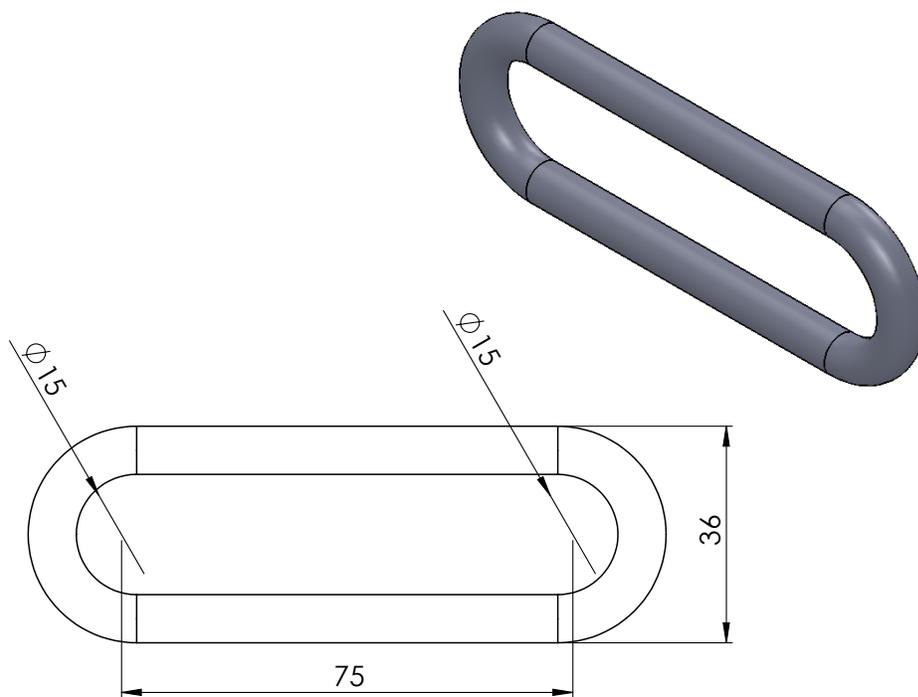
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 2x1/8"	CANTIDAD 19 cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js 16	TÍTULO:  Sujetador DAE	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: ACERO ASTM A-36	N.º DE DIBUJO SD	A4
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



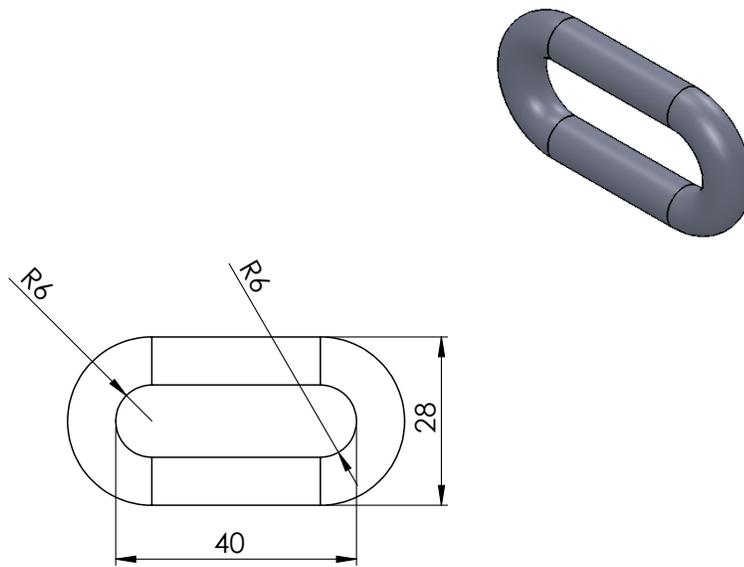
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 2x1/8"	CANTIDAD 19 cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO:  <h2 style="margin: 0;">Abrazadera 1</h2>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A-36</b>	N.º DE DIBUJO <b>A1</b>	<b>A4</b>
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



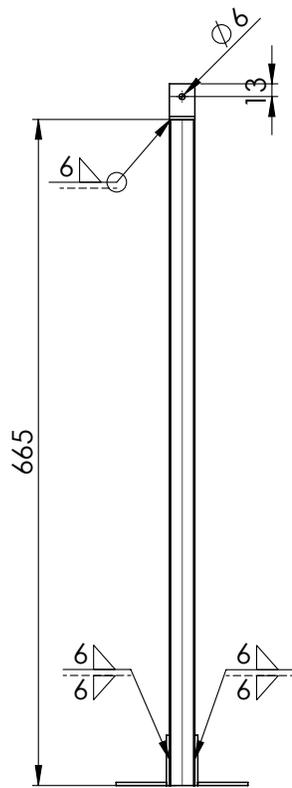
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 1x1/8"	CANTIDAD 19cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js 16	TÍTULO: Abrazadera 2	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: ACERO ASTM A-36	N.º DE DIBUJO A2	A4
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



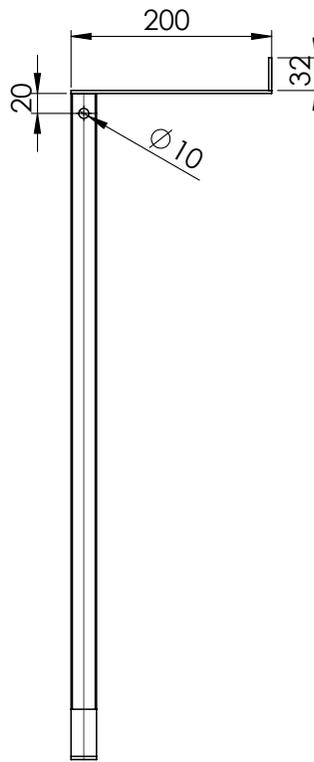
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera redonda 5/16''	CANTIDAD 27 cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO: <p style="text-align: center;">Guía</p>	
		CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO <p style="text-align: center;">G</p>	
		MATERIAL: <p style="text-align: center;">ACERO ASTM A-36</p>	A4	
		UNIDADES: mm	ESCALA:1:1 HOJA 1 DE 1	



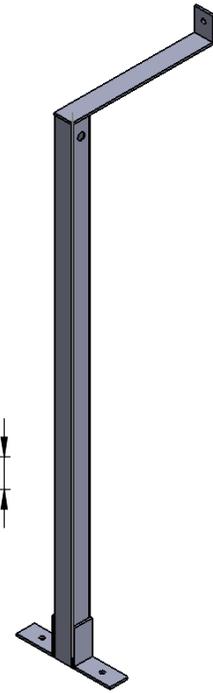
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera redonda 5/16"	CANTIDAD 21 cm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js1 6	TÍTULO: <p style="text-align: center;">Arillo</p>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: ACERO ASTM A-36	N.º DE DIBUJO A	A4
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



ESCALA 1 : 6

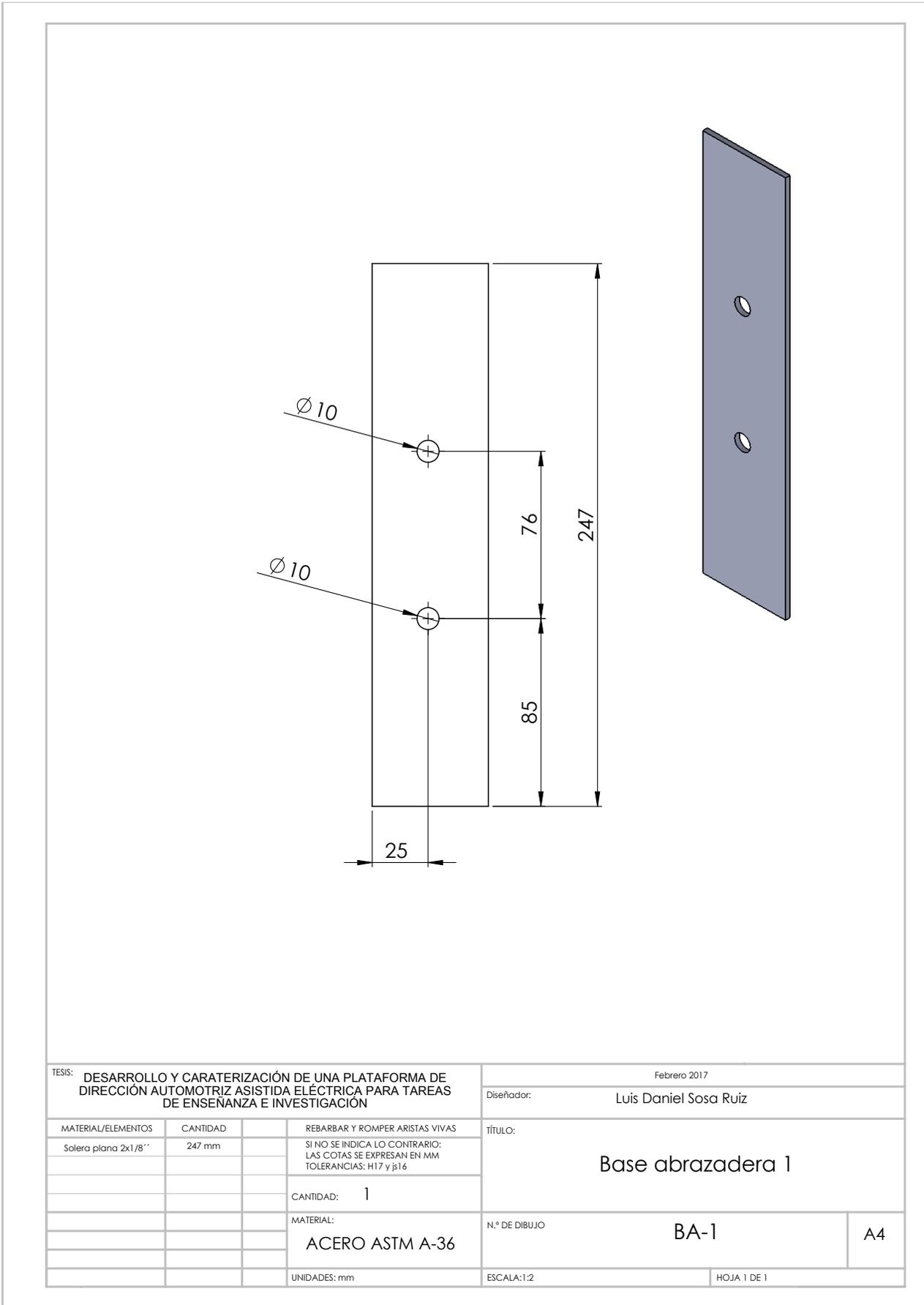


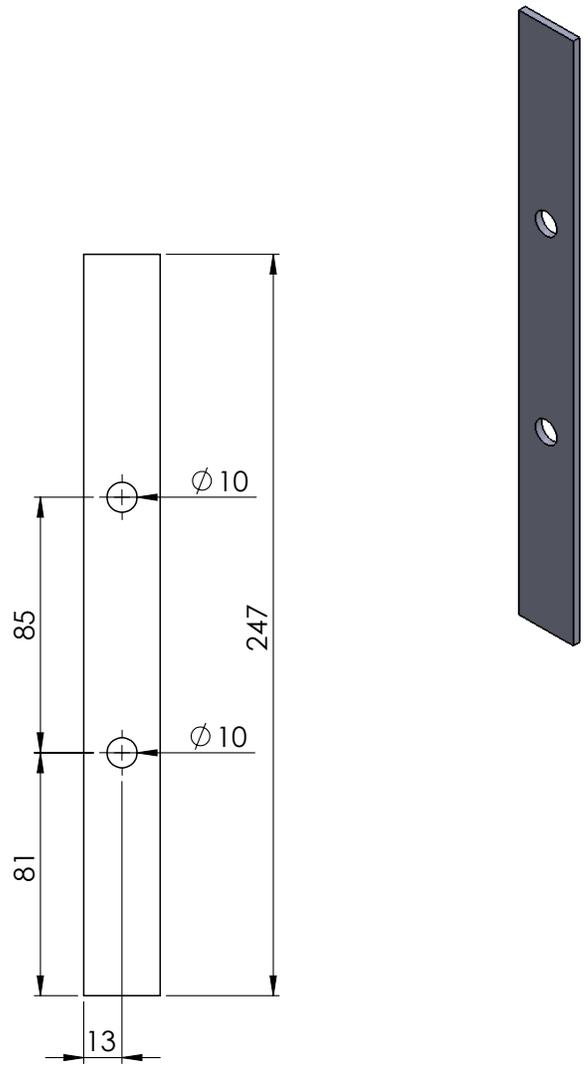
ESCALA 1 : 6



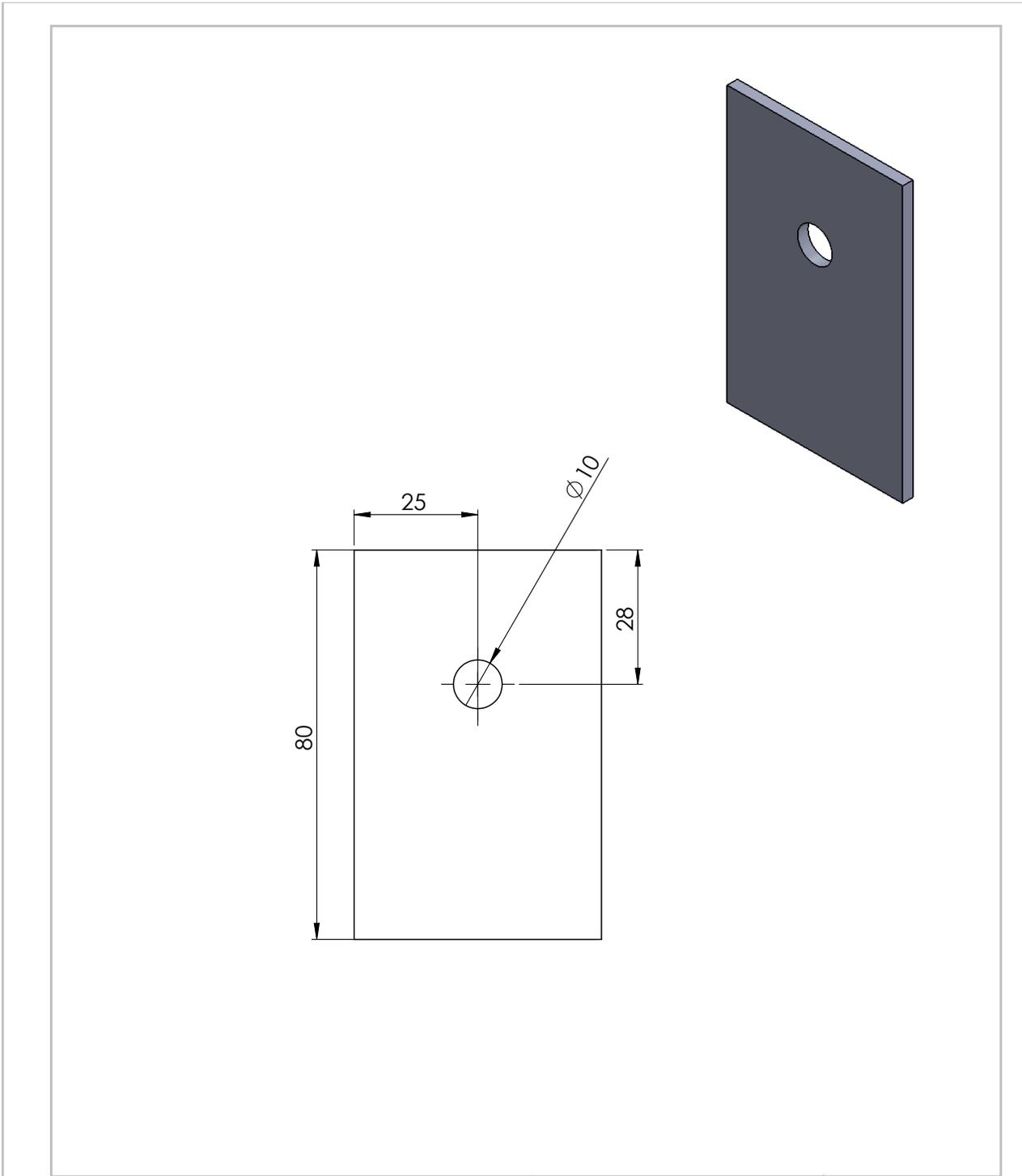
ESCALA 1 : 6

TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS PTR 1X1'' Cal:16 Sujetador estructural Solera plana de 1x1/8''	CANTIDAD 664 mm 2 piezas 232 mm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO: <h3 style="text-align: center;">Columna de soporte DAE</h3>	
			CANTIDAD: 1	
			MATERIAL: <h3 style="text-align: center;">ACERO ASTM A500</h3>	
			UNIDADES: mm	
			N.º DE DIBUJO <h2 style="text-align: center;">CSD</h2>	A4
			ESCALA:1:6	HOJA 1 DE 1

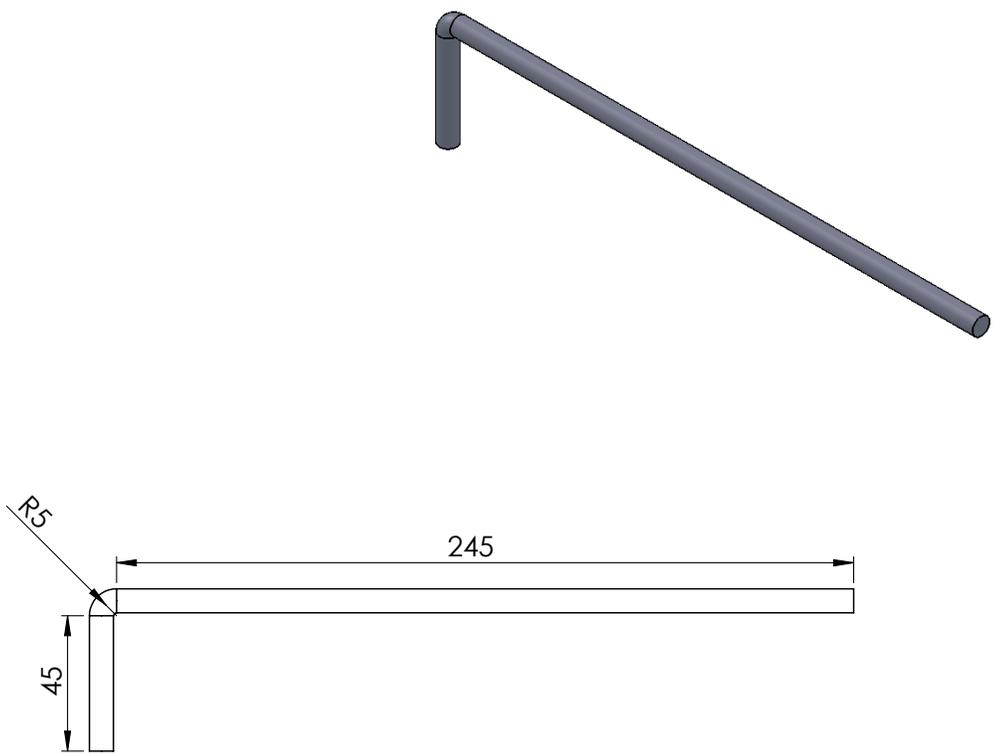




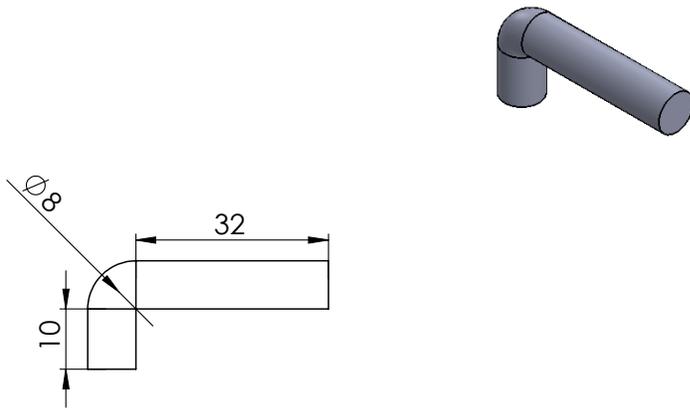
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 1x1/8"	CANTIDAD 247 mm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO:  <b>Base abrazadera 2</b>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A-36</b>	N.º DE DIBUJO <b>BA-2</b>	<b>A4</b>
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



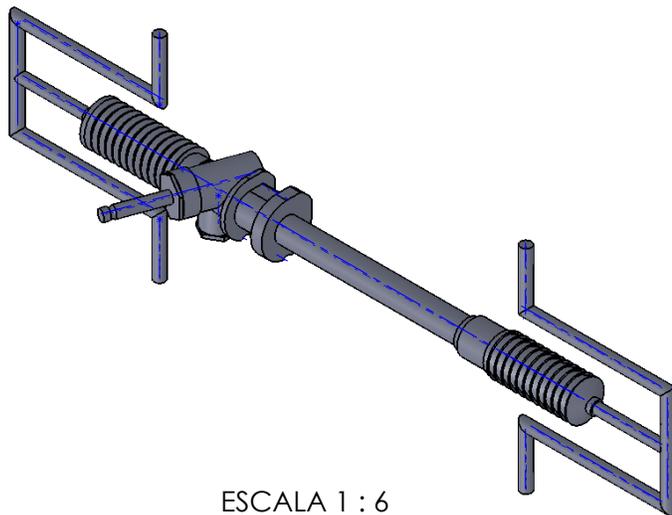
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera plana 2x1/8"	CANTIDAD 80 mm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS  SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO:  <b>Sujetador resorte</b>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A-36</b>	N.º DE DIBUJO <b>SR</b>	<b>A4</b>
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



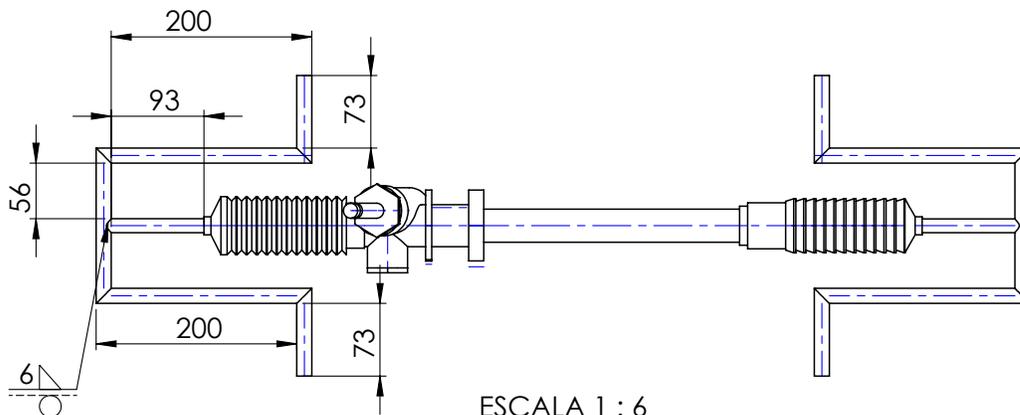
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera redonda 1/4"	CANTIDAD 295 mm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO: Pasador DAE	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: ACERO ASTM A500	N.º DE DIBUJO PD	A4
		UNIDADES: mm	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera redonda 3/8"	CANTIDAD 45mm	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS  SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	TÍTULO:  Pasador resorte	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: ACERO ASTM A500	N.º DE DIBUJO PR	A4
		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

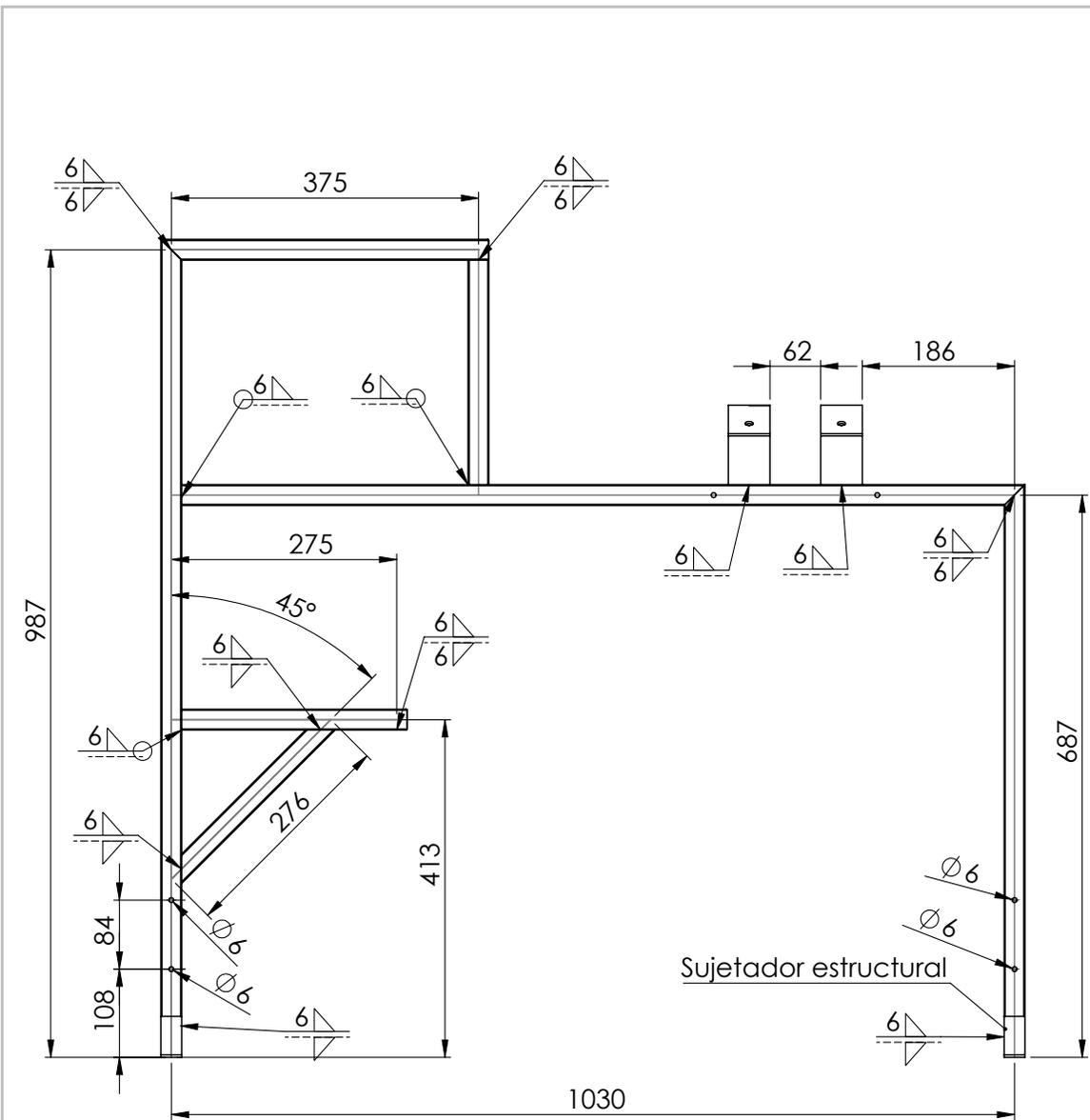


ESCALA 1 : 6

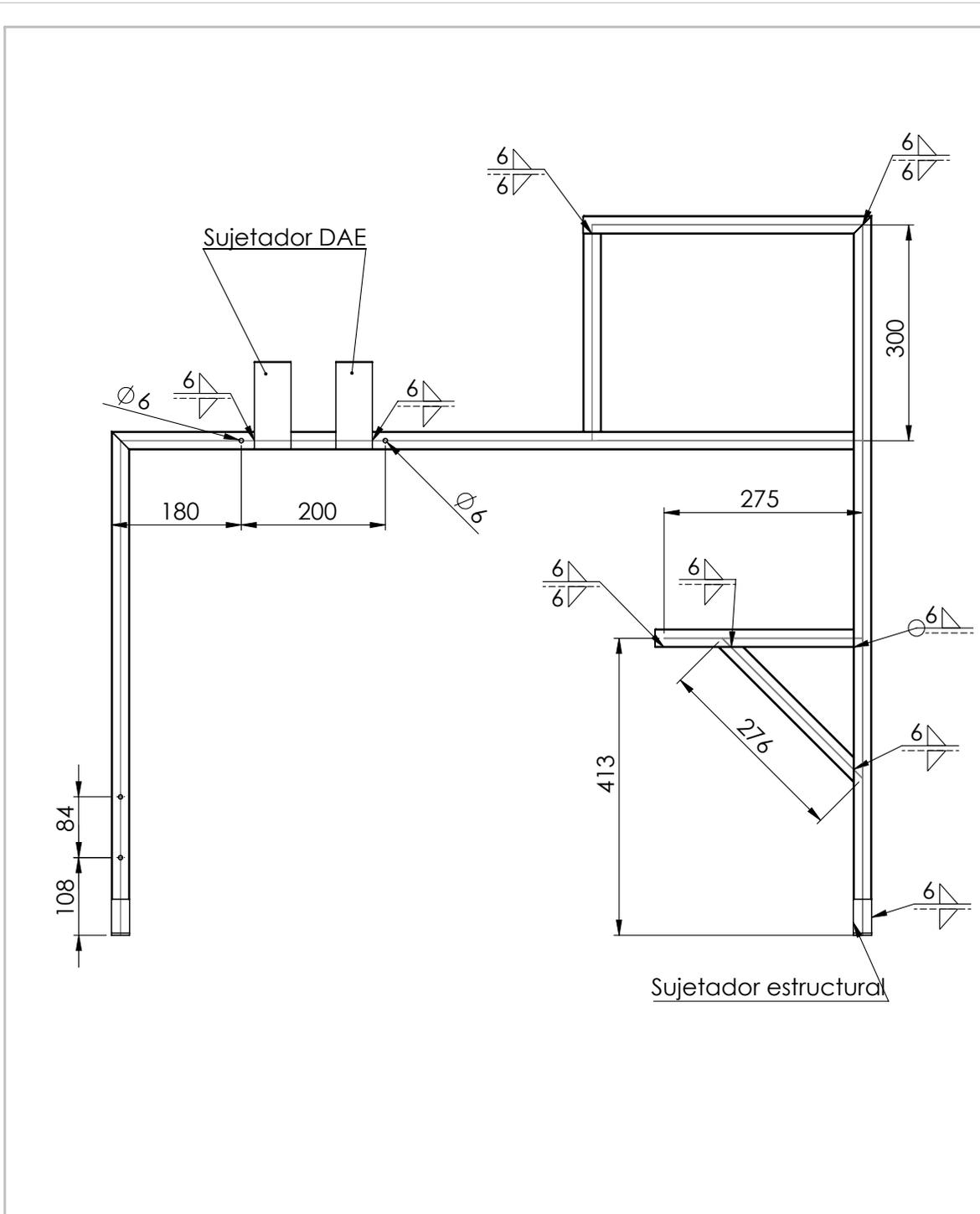


ESCALA 1 : 6

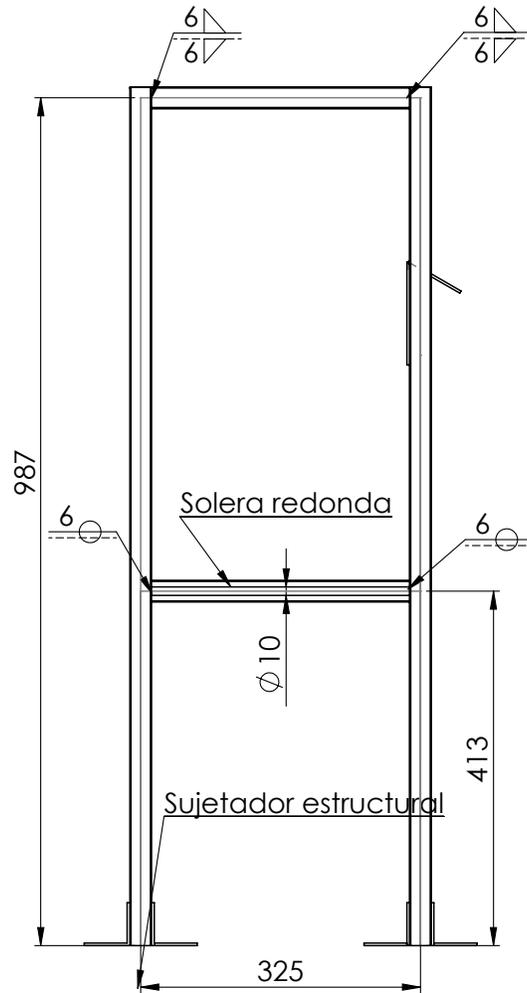
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS Solera redonda 5/8"	CANTIDAD 1.4 m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: js16	TÍTULO: <b>Piñón cremallera modificado</b>	
		CANTIDAD: 1		
		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>	N.º DE DIBUJO <b>PCM</b>	<b>A4</b>
		UNIDADES: mm	ESCALA:1:6	HOJA 1 DE 1



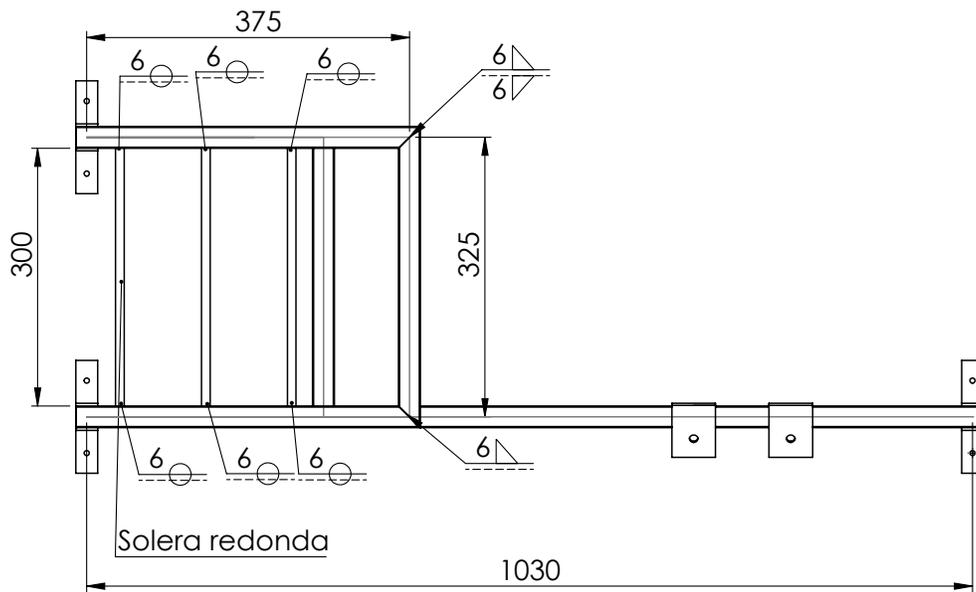
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS PTR 1 X 1" Cal:16 Sujetador DAE Sujetador estructural Solera redondna 3/8"	CANTIDAD 6.6m 2 6 0.9m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: ±2mm	TÍTULO: <h3 style="text-align: center;">Estructura superior</h3>	
			CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO ES-A
			MATERIAL: ASTM A500	A4
			UNIDADES: mm	ESCALA:1:7
			HOJA 1 DE 6	



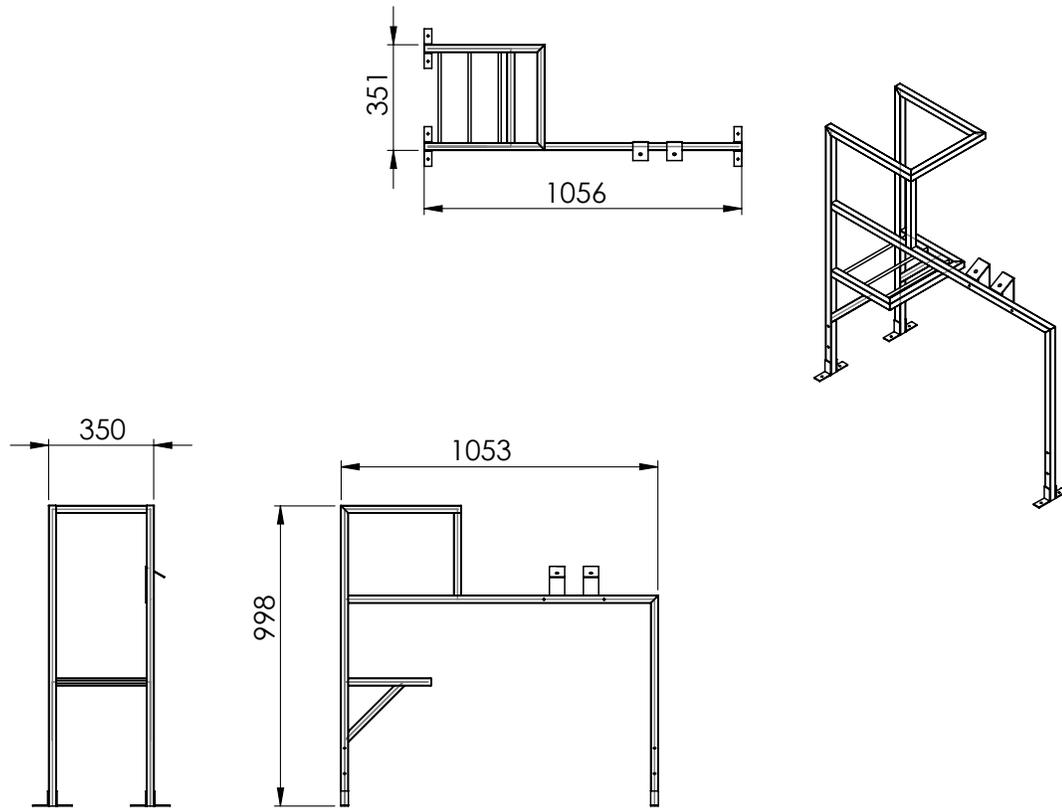
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS	CANTIDAD		TÍTULO: Estructura superior	
PTR 1X1'' Cal:16	2m		N.º DE DIBUJO: ES-B	
Sujetador DAE	2	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: ±2mm	A4	
Sujetador estructural	6	CANTIDAD: 1		
Solera redonda 3/8''	0.9m	MATERIAL: ASTM A500		
		UNIDADES: mm	ESCALA:1:7	HOJA 2 DE 6



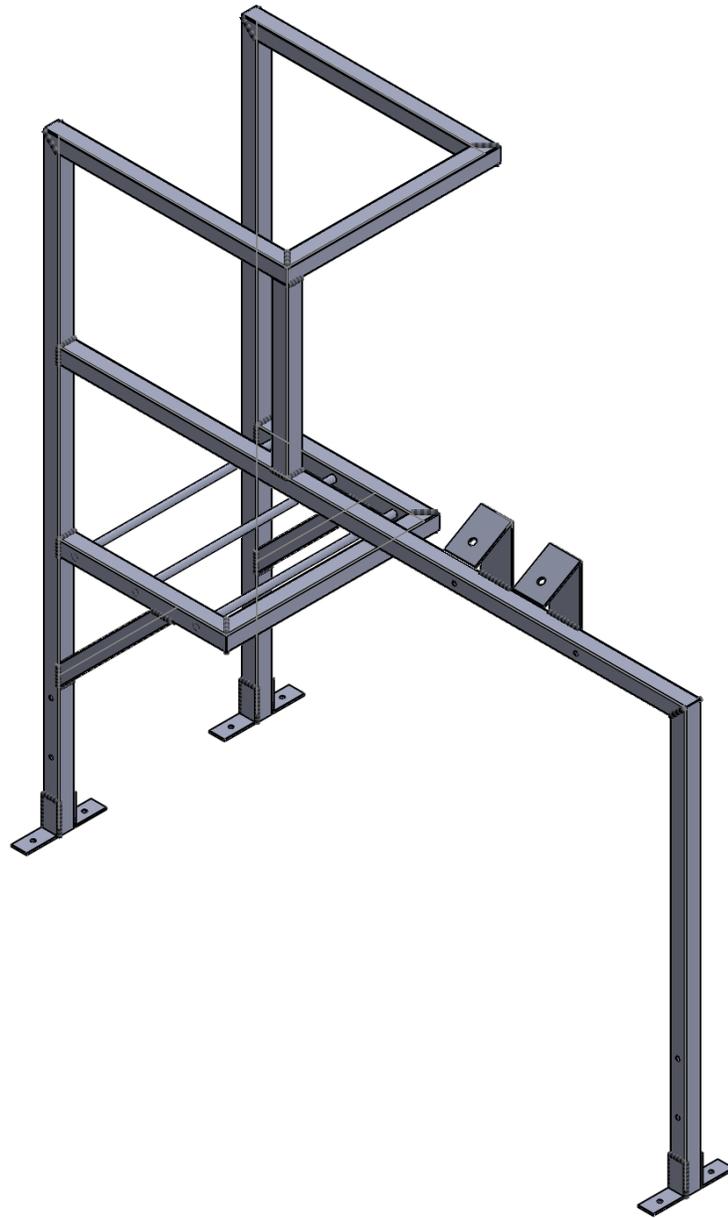
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS PTR 1 X 1'' Cal:16 Sujetador DAE Sujetador estructural Solera redonda 3/8''	CANTIDAD 2m 2 6 0.9m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: ±2mm CANTIDAD: 1 MATERIAL: ASTM A500 UNIDADES: mm	TÍTULO: <b>Estructura superior</b> N.º DE DIBUJO ES-C A4	
			ESCALA: 1:7	HOJA 3 DE 6



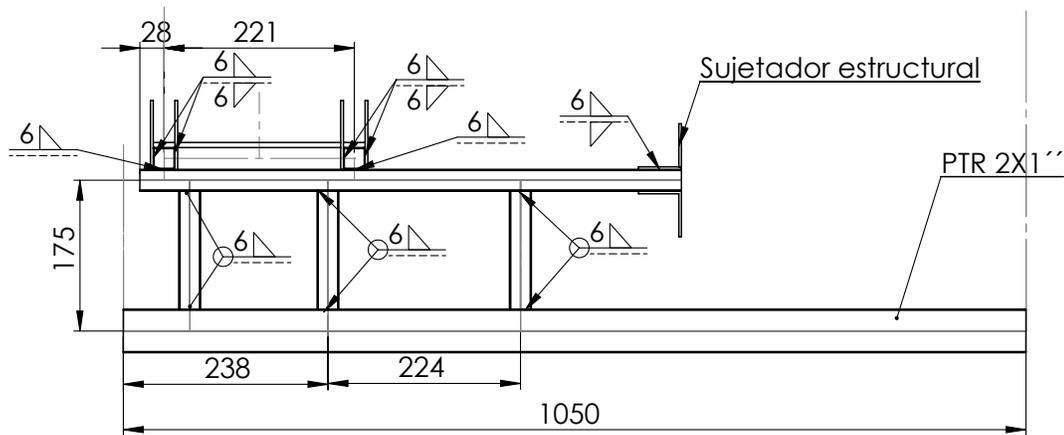
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS	CANTIDAD		TÍTULO:  <h2 style="text-align: center;">Estructura superior</h2>	
PTR 1X1'' Cal:16	2m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		
Sujetador DAE	2	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: ±2mm		
Sujetador estructural	6	CANTIDAD: 1		
Solera redonda 3/8''	0.9m	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	ES-D
		ASTM A500		A4
		UNIDADES: mm	ESCALA:1:7	HOJA 4 DE 6



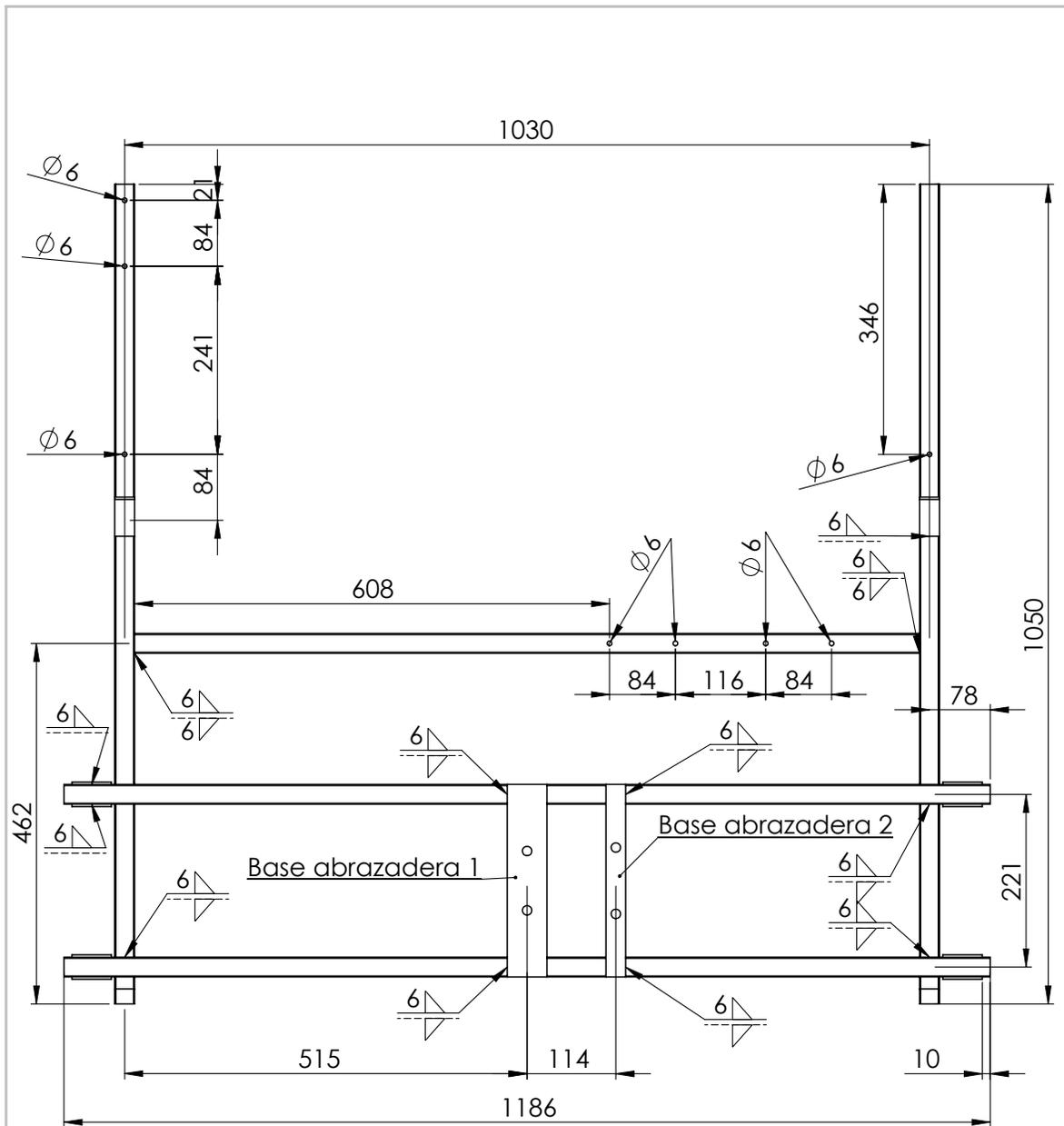
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017			
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz			
MATERIAL/ELEMENTOS			TÍTULO:			
PTR 1X1" Cal:16	5.5 m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	<b>Estructura inferior</b>			
PTR 2X1" Cal:16	2.1m					
Sujetador estructural	4 piezas	CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO <b>EI-D</b>			
Base abrazadera 1	1 pieza	MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>			<b>A4</b>	
Base abrazadera 2	1 pieza					
Sujetador resorte	8 piezas					
UNIDADES: mm			ESCALA: 1:20	HOJA 5 DE 6		



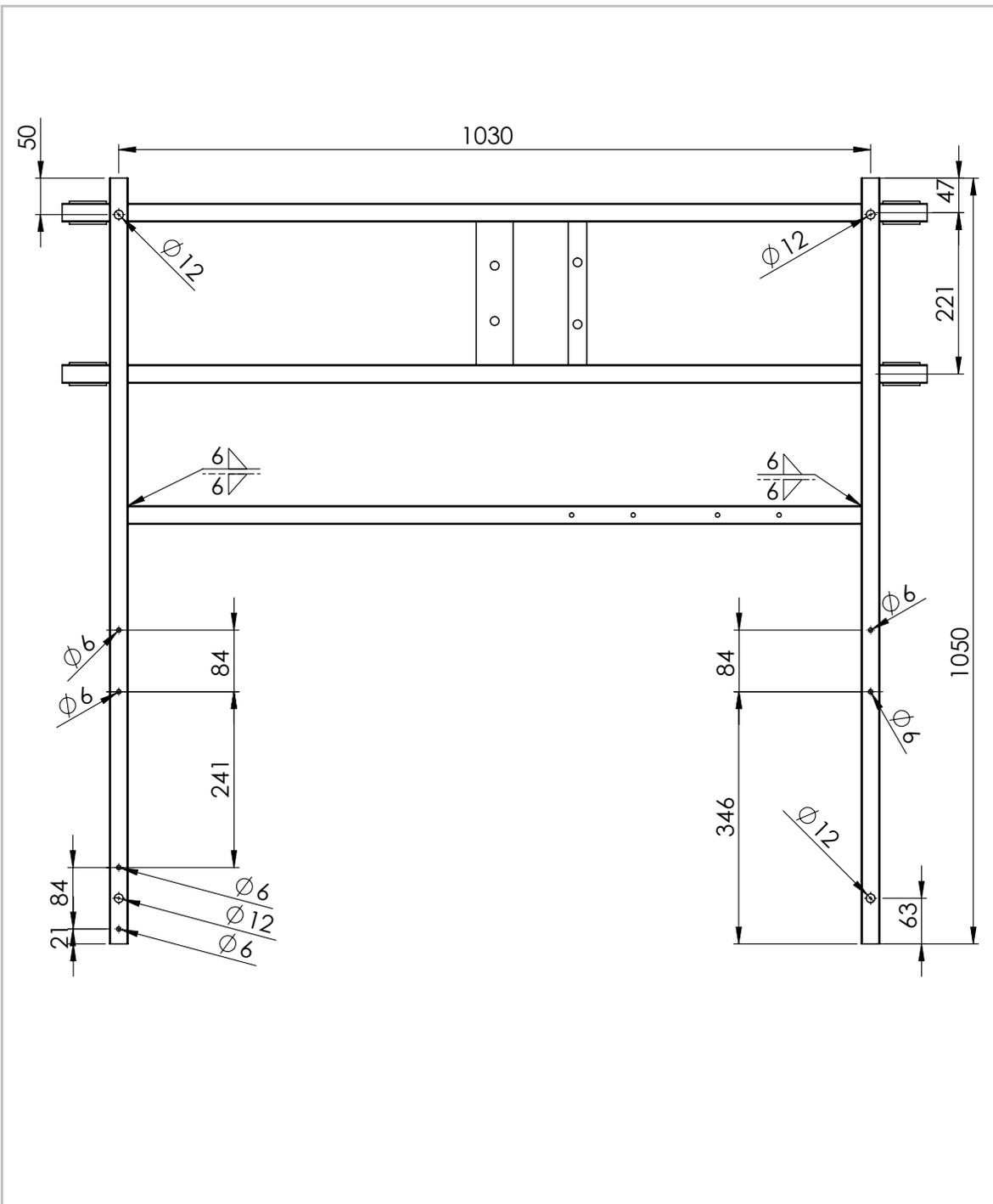
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017		
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz		
MATERIAL/ELEMENTOS	CANTIDAD		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y j16	TÍTULO:  <b>Estructura superior</b>	
PTR 1X1'' Cal:16	2m				
Sujetador DAE	2				
Sujetador estructural	6				
Solera redonda 3/8''	0.9m		CANTIDAD: 1		
			MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>	N.º DE DIBUJO <b>ES-E</b>	<b>A4</b>
			UNIDADES: mm	ESCALA:1:7	HOJA 6 DE 6



TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
			TÍTULO: Estructura inferior	
MATERIAL/ELEMENTOS	CANTIDAD		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	
PTR 1X1'' Cat:16	5.5 m		CANTIDAD: 1	
PTR 2X1'' Cat:16	2.1m			
Sujetador estructural	4 piezas		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>	
Base abrazadera 1	1 pieza			
Base abrazadera 2	1 pieza		N.º DE DIBUJO <b>EI-A</b>	
Sujetador resorte	8 piezas		A4	
			UNIDADES: mm	
			ESCALA:1:7	
			HOJA 1 DE 6	

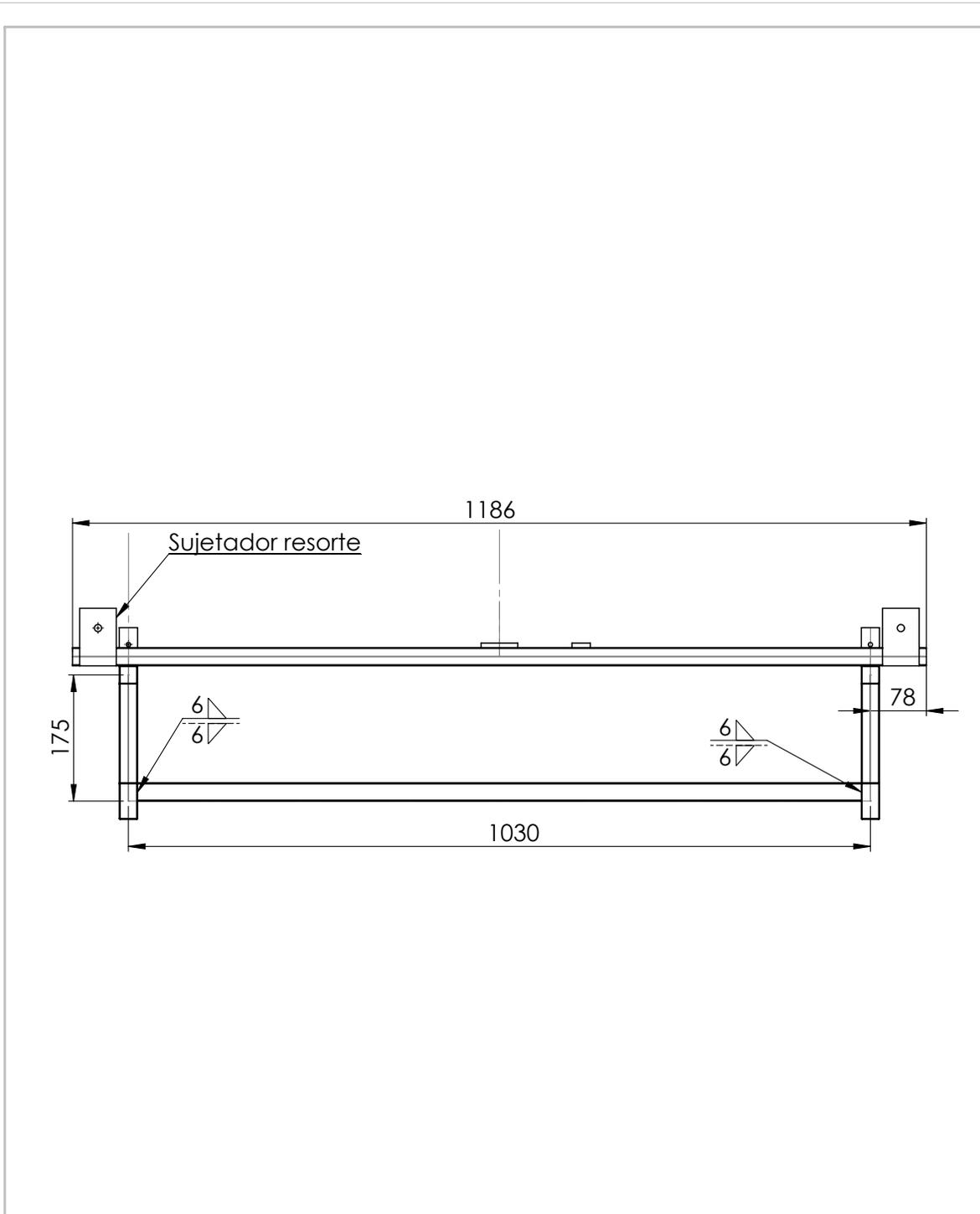


TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS			TÍTULO:	
PTR 1X1'' Cal:16	5.5 m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	<b>Estructura inferior</b>	
PTR 2X1'' Cal:16	2.1m			
Sujetador estructural	4 piezas	CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO	
Base abrazadera 1	1 pieza	MATERIAL:		
Base abrazadera 2	1 pieza	<b>ACERO ASTM A500</b>	<b>EI-B</b>	<b>A4</b>
Sujetador resorte	8 piezas	UNIDADES: mm	ESCALA:1:7	HOJA 2 DE 6

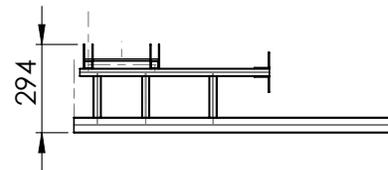
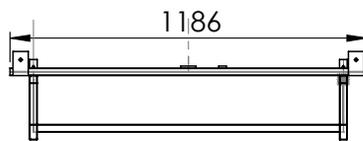
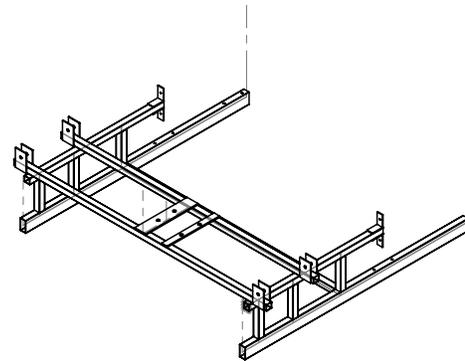
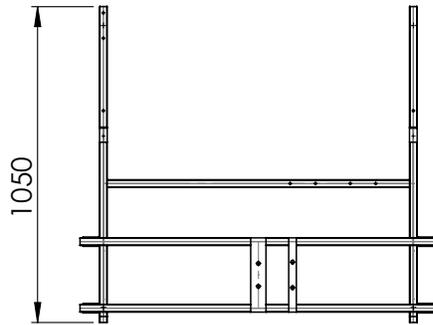


TESIS: <b>DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017			
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz			
MATERIAL/ELEMENTOS			TÍTULO:			
PTR 1X1" Cat:16	5.5 m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	<b>Estructura inferior</b>			
PTR 2X1" Cat:16	2.1m					
Sujetador estructural	4 piezas	CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO			
Base abrazadera 1	1 pieza	MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>			<b>EI-C</b>	
Base abrazadera 2	1 pieza					
Sujetador resorte	8 piezas					
UNIDADES: mm			ESCALA:1:7	HOJA 3 DE 6		

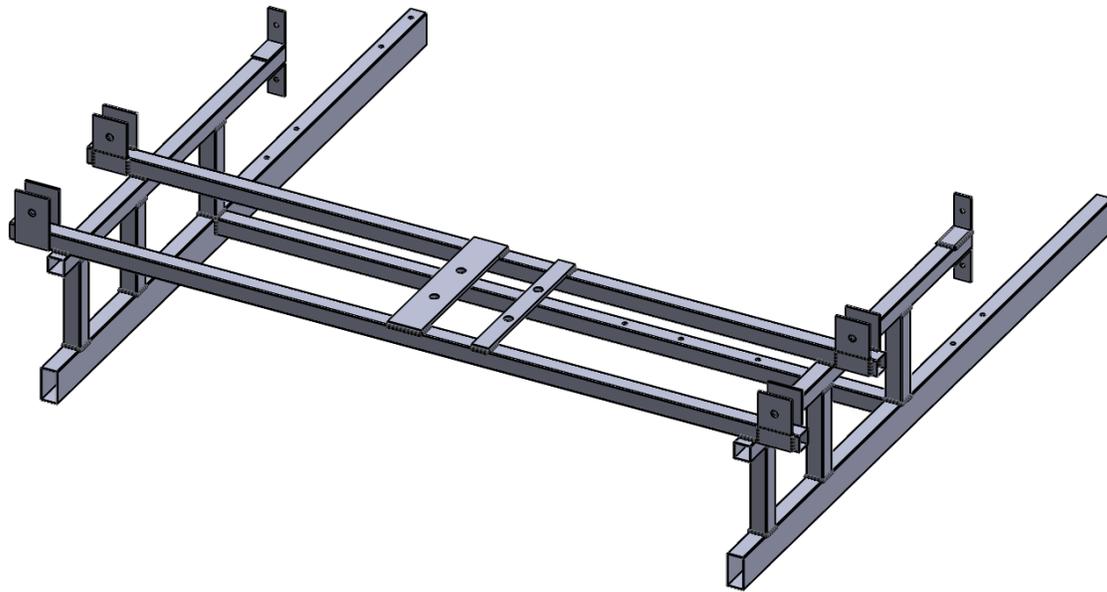
A4



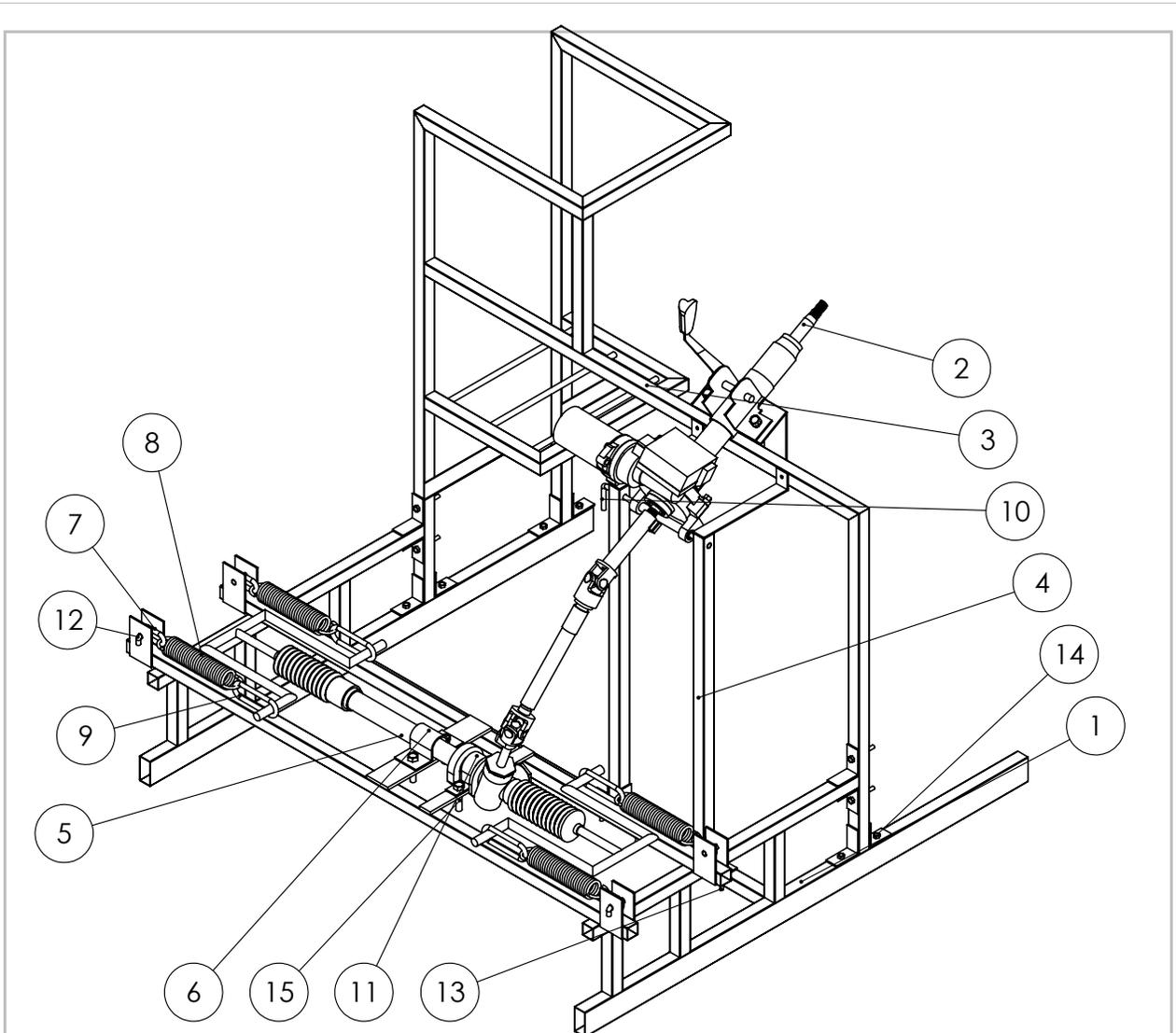
TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS			TÍTULO:	
PTR 1X1'' Cal:16	5.5 m	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16	<b>Estructura inferior</b>	
PTR 2X1'' Cal:16	2.1m			
Sujetador estructural	4 piezas	CANTIDAD: 1	N.º DE DIBUJO	
Base abrazadera 1	1 pieza	MATERIAL:		
Base abrazadera 2	1 pieza	<b>ACERO ASTM A500</b>	<b>EI-D</b>	<b>A4</b>
Sujetador resorte	8 piezas	UNIDADES: mm	ESCALA:1:7	HOJA 4 DE 6



TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017		
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz		
MATERIAL/ELEMENTOS	CANTIDAD		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16		
PTR 1X1" Cat:16	5.5 m				
PTR 2X1" Cat:16	2.1m		CANTIDAD: 1		
Sujetador estructural	4 piezas				
Base abrazadera 1	1 pieza		MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>		
Base abrazadera 2	1 pieza				
			UNIDADES: mm		N.º DE DIBUJO: EI-E
			ESCALA: 1:20		A4
			HOJA 5 DE 6		



TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>			Febrero 2017	
			Diseñador: Luis Daniel Sosa Ruiz	
MATERIAL/ELEMENTOS      CANTIDAD      REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: H17 y js16			TÍTULO:  <h2 style="text-align: center;">Estructura inferior</h2>	
PTR 1X1'' Cal:16 PTR 2X1'' Cal:16 Sujetador estructural Base abrazadera 1 Base abrazadera 2 Sujetador resorte	5.5 m 2.1m 4 piezas 1 pieza 1 pieza 8 piezas	CANTIDAD: <h3 style="text-align: center;">1</h3>	N.º DE DIBUJO <h2 style="text-align: center;">EI-F</h2>	
MATERIAL: <h3 style="text-align: center;">ACERO ASTM A500</h3>			A4	
UNIDADES: mm			ESCALA:1:8      HOJA 6 DE 6	



N.º DE ELEMENTO	PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Estructura inferior		1
2	DAE		1
3	Estructura superior		1
4	Columna soporte DAE		2
5	Piñón cremallera modificado	Piñón-cremallera de automóvil marca Nissan modelo Tsuru	1
6	Abrazadera 1		1
7	Ariño		4
8	Resorte	Resorte comercial elegido y caracterizado	4
9	Guía		4
10	Pasador DAE	DAE marca Koyo automóvil Pontiac G5	1
11	Abrazadera 2		1
12	Pasador resorte		4
13	Perno M6 x 1.0 x 50		8
14	Perno M6 x 1.0 x 60		6
15	Perno M10 x 1.5 x 45		6

TESIS: <b>DESARROLLO Y CARATERIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE DIRECCIÓN AUTOMOTRIZ ASISTIDA ELÉCTRICA PARA TAREAS DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN</b>		Diseñador: <b>Luis Daniel Sosa Ruiz</b>	
		Febrero 2017	
		TÍTULO: <b>Ensamble plataforma</b>	
CANTIDAD: <b>1</b>		N.º DE DIBUJO: <b>EP</b>	
MATERIAL: <b>ACERO ASTM A500</b>		ESCALA: 1:10	
UNIDADES: mm		HOJA 1 DE 1	
		A4	



# Bibliografía

- [1] Sulakhe N. V., Ghodeswar A. M., and Gite M. D. Electric power assisted steering. *Journal of Engineering Research and Applications*, 3(6):661,666, 2013.
- [2] Wikipedia. Power steering. [https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_steering](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_steering). Acceso: 28-10-2015.
- [3] Rösth M. *Hydraulic Power Steering System Desing in Road Vehicles*. LTAB Linköpings Tryckeri AB, 2007.
- [4] Rahman M.F. Electric power assisted steering system for automobiles. *Electrical Engineering*, III, 2012.
- [5] Burton A. W. Innovation drivers for electric power- assisted steering. *IEEE Control Systems*, 23(6):30,39, 2003.
- [6] Tuquinga C.L. A. y Mejía S. S. M. Construcción e implementación de un tablero didáctico del sistema de dirección asistida eléctricamente (eps) para la escuela de ingeniería automotriz. *Tesis de licenciatura, Escuela superior politécnica de Chimborazo, Ecuador*, 2012.
- [7] Chitu C., Lackner J., Horn M., Srikanth P. P., Waser H., and Kohlbock M. Controller desing for an electric power steering system based on lqr techniques. *Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 32(3):763,775, 2013.
- [8] Shwetha G.N., Ramesh H.R., and Shankapal S.R. Modeling, simulation and implementation of a proportional-derivative controlled column-type eps. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology and Engineering*, 2(9):10,19, 2013.
- [9] Berliner S. The dudgeon steam automobile of 1857. <http://sbiii.com/dudgeon.html>. Acceso: 18-01-2016.
- [10] Schultz M. Steering: A century of progress. *Popular Mechanics*, 162(5):52–58, 1985.
- [11] Twyford R.E. Driving-gear for motor-carriages. <http://www.google.com/patents/US646477>. Acceso: 18-01-2016.
- [12] Howe E.H. Mr. power steering's ship comes in. *Popular Science*, 168(2):161–164,270, 1956.
- [13] Emadi A., Ehsani M., and Miller M.J. *Vehicular Electric Power Systems*. Marcel Dekker, 2004.

- [14] Crolla A. D. *Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body*. Elsevier Science, 2009.
- [15] Marcovich A. Look, ma-no wheel. *Popular Mechanics*, 123(4):91–95, 1965.
- [16] TRW. Electrically powered hydraulic steering. [https://www.trw.com/steering\\_systems/steering/electrically\\_powered\\_hydraulic\\_steering](https://www.trw.com/steering_systems/steering/electrically_powered_hydraulic_steering). Accesado: 18-01-2016.
- [17] Forbes J. E., Baird S. M., and Weisgerber T. W. Electrohydraulic power steering – an advanced system for unique applications. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 02 1987.
- [18] Volkswagen. Ephs electrically powered hydraulic steering. [http://www.volkswagen.com/technik/ssp/ssp/SSP\\_259.pdf](http://www.volkswagen.com/technik/ssp/ssp/SSP_259.pdf). Accesado: 13-01-2016.
- [19] VanGelder T. K. *Fundamentals of Automotive Technology Principles and Practice*. Jones & Bartlett, 2014.
- [20] Keebler J. So long, hydraulics-the electronic revolution in power steering. *Popular Science*, 228(5):50–56, 1986.
- [21] Miyazaki H. Technical trends in steering system. In *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pages 133,1336, 2008.
- [22] Miyazaki H. Future views on eps system technological development. *JTEKT Engineering Journal*, pages 19,22, 2012.
- [23] Hyung L. M., Ki H. S., Young C. J., and Sup Y. K. Improvement of the steering feel of an electric power steering system by torque map modification. *Mechanical Science and Technology*, 19(3):792,801, 2005.
- [24] Jung Y. C., Rung H. S., Chih L. M., Hsien H. T., and Hua H. T. Development of a test bench for tuning and validating electric power steering control method. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–5, 2007.
- [25] Kurishige M., Wada S., Kifuku T., Inoue N., Nishiyama R., and Otagaki S. A new eps control strategy to improve steering wheel return-ability. *SAE Technical Paper*, 2000. doi:10.4271/2000-01-0815.
- [26] Alvarado T. E. E. y Díaz S. J. P. Estudio del sistema de dirección asistida electrónicamente (eps) y construcción de una maqueta funcional para la carrera de ingeniería mecánica automotriz. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2009.
- [27] Hosam K. F., Zoran S. F., Hagen J., and Stein L. J. Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area. In *Proceedings of SPIE*, volume 6228, pages 1–20, 2006.
- [28] Kiliñç E., Atabay O., Server E. Ş., and Erdonğan H. Design and manufacturing of a modular steering system test bench for durability, performance and characterization test applications. In *7 Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 2014.

- [29] Segawa M., Higashi M., Nakano S., Shino M., and Nagai M. Development of simulator for evaluation of steering systems. *Koyo Engineering Journal*, (168E), 2005.
- [30] Merkel A. Electric power steering: Past, present and future. <http://www.brakeandfrontend.com/electric-power-steering-past-present-future/>. Accesado: 05-09-2015.
- [31] Moriyama M. Development trend of advanced steering system. *Koyo Engineering Journal*, (165E):8,13, 2004.
- [32] Segawa M., Hayama R., and Nakano S. A study on reactive torque for steer by wire system (sbw) with mechanical fail-safe device. *Koyo Engineering Journal*, (162E):42,46, 2003.
- [33] Setlur P., Wagner J., Dawson D., and Powers L. A hardware-in-the-loop and virtual reality test environment for steer-by-wire system evaluations. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 2584–2589, 2003.
- [34] Gurudatta Y. S. S. and Krishnaiah V. R. Haptic science and technology. *International Journal of Computer Engineering and Applications*, II:139–146, 2013.
- [35] Mohammad R. A. Design of control system for electric power steering in vehicle. In *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pages 2944–2948, Kuala Lumpur, Malaysia, Marzo 2016.
- [36] Yan H. and Benxian X. Research on power characteristic of the electric forklift eps system. *International journal on smart sensing and intelligent systems*, 8(3):1768–1785, Septiembre 2015.
- [37] Mizanoor R. S. M., Ikeura R., Hayakawa S., and Sawai H. Design and control of a power assist system for lifting objects based on human operator’s weight perception and load force characteristics. *IEEE Transactions on industrial electric*, 58(8):3141,3150, 2011.
- [38] El libro del automóvil. *Reader’s Digest*, 1978.
- [39] Kandula P. B. Dynamics and control of an electric power assist steering system. Master’s thesis, Cleveland State University, U.S.A., 2010.
- [40] CARS Training Network Inc. Learning guide: Chasis specialist, electric power steering [manual], 2014. <http://www.carsondemand.com/IDLdocuments/Learning%20Guide/4532-s02o5u38ibql37v8ea66881wy.pdf>. Accesado: 31-10-2015.
- [41] Zhao J., Chen L., Jiang H., and Niu L. Desing and full-car tests of electric power steering system. Technical report, School of Automobile and Trafic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, China, 2013.
- [42] DieselNet. Emission test cycles. [https://www.dieselnets.com/standards/cycles/e-ce\\_eudc.php](https://www.dieselnets.com/standards/cycles/e-ce_eudc.php). Accesado: 29-10-2015.
- [43] Wikipedia. Ciclo de conducción. [http://es.wikipedia.org/wiki/New\\_European\\_Driving\\_Cycle](http://es.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle). Accesado: 29-10-2015.

- [44] Dey R. Electronic power assisted steering system. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 1:23–25, 2012.
- [45] Lixin auto electrical. Electric power steering. <https://sites.google.com/site/lixinautoelectrical/electric-power-steering>. Accesado: 28-10-2015.
- [46] Ijiri W. and Tsutsui T. Technical trends of electric power steering system. *Koyo Engineering Journal*, (162E):27,31, 2003.
- [47] Vorotovic G. S., Rakicevic B. B., Mitic S. R., and Stamenkovic D. D. Determination of cornering stiffness through integration of a mathematical model and real vehicle exploitation parameters. *FME Transactions*, 41(1):66,71, 2013.
- [48] Sakai Y. and Kaoku T. Development of non-contact type torque sensor for electric power steering using green compact core component. *Koyo Engineering Journal*, (167E):59,65,2005.
- [49] Yoshida K. Development of custom ic for eps torque sensor. *Koyo Engineering Journal*, (160E):48,51, 2002.
- [50] NSK. The next generation of vehicle power steering. <http://www.bearing.co.il/EPAS.pdf>. Accesado: 10-10-2015.
- [51] Qun Z. The design of power assisted characteristic curve for electric power steering system. *Convergence Information Technology*, 7(17):260,266, 2012.
- [52] Ciarla V., Cahouvet V., Canudas de Wit C., and Quaine F. Genesis of booster curves in electric power assistance steering system. *In Proceedings of 15th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 1,6, 2012.
- [53] Wikipedia. Función potencial de Steven. [http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n\\_potencial\\_de\\_Stevens](http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_potencial_de_Stevens). Accesado: 28-10-2015.
- [54] Mott L. R. and P.E. Diseño de elementos de máquinas, chapter 19, pages 729–772. *Printence Hall*, 2006.
- [55] Casado E.Á. . Mecánica del vehículo. *Paraninfo*, 2014.
- [56] Fukudome F. Thechnical trends regarding electric components for electric power steering systems. *Koyo Engineering Journal*, (163E):32,36, 2003.
- [57] Pontiac g5. <http://www.eautorepair.net/Marketing/Default.asp>. Accesado: 22-09-2016.
- [58] Gmlan. <https://en.wikipedia.org/wiki/GMLAN>. Accesado: 03-11-2016.
- [59] Pheanis D. C. and Tenney J. A. . Vehicle-bus interface with gmlan for data collection. *In Proceedings of the ISCA 18th International Conference Computers and Their Applications*, 2003.

- [60] Chamú M. C. A. Desarrollo de un sistema educativo para la enseñanza del protocolo de comunicaciones can. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 2005.
- [61] Johansson K. H., Törngren M. , and Nielsen L. Vehicle Applications of Controller Area Network, pages 741–765. 2005.
- [62] Robert Bosch GmbH. CAN Specification 2.0, 1991.
- [63] Wikipedia. Bus can. [https://es.wikipedia.org/wiki/Bus\\_CAN](https://es.wikipedia.org/wiki/Bus_CAN). Accesado: 04-11-2016.
- [64] Inc. Intrepid Control Systems. Vehicle spy.[www.vehicle\\_spy](http://www.vehicle_spy.com), 2016.
- [65] Seeed Studio. Can-bus shield. [http://wiki.seeed.cc/CAN-BUS\\_Shield\\_V1.2](http://wiki.seeed.cc/CAN-BUS_Shield_V1.2), 2016. Accesado: 12-10-2016.
- [66] Volkswagen. El intercambio de datos en el bus de datos can i. <http://www.astac.es/docs/mecanica/CANBUS.pdf>. Accesado: 12-10-2015.
- [67] F.W. Bell. Magneto-resistive current sensor for peak current up to 150 a. [www.fwbell.com](http://www.fwbell.com). Accesado: 12-10-2016.
- [68] Taniguchi M., Nagano H., Daido T., Kuramoto I., Nohara M., and Kyotani H. Torque sensor, March 13 1990. US Patent 4,907,460.
- [69] BK PRECISION. Manual LCR Meter Operating Manual Model 885 and 886. 22820 Savi Ranch PKWY. Yorba Linda, CA 92887-4610 USA, 2006.
- [70] Coughlin R. F. and Driscoll F. F. . Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, chapter 7, pages 190–193. Printece-Hall Hispanoamericana, 1993.
- [71] González de la Rosa J.J. Circuitos analógicos aplicados. [http://www2.uca.es/grup-invest/instrument\\_electro/ppjjgdr/Cir\\_An\\_Apl/Cir\\_An\\_Apl\\_arch/temas/T5\\_caa.pdf](http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/ppjjgdr/Cir_An_Apl/Cir_An_Apl_arch/temas/T5_caa.pdf). Accesado: 28-10-2016.
- [72] Analog Device. Low cost low power instrumentation amplifier. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>. Accesado: 29-10-2016.
- [73] National Semiconductor. Lm117/lm317a/lm317. <http://datasheet.octopart.com/LM317T-National-Semiconductor-datasheet-35719.pdf>. Accesado: 10-11-2016.
- [74] STMicroelectronics. Low-power dual operational amplifiers. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/61/46/87/01/98/ed/44/c5/CD00000464.pdf/files/CD00000464.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000464.pdf>. Accesado: 10-11-2016.
- [75] Leale R. Canbushack. <http://www.canbushack.com/blog/index.php>. Accesado:13-11-2016.

- [76] Shigley E. J. and Mitchell L.D. *Diseño en Ingeniería Mecánica*, chapter 9, pages 457–476. McGraw Hill, 2008.
- [77] Charles K. Alexander and Matthew N.O. Sadiku. *Fundamentos de circuitos eléctricos*, chapter 5, pages 175–180. 3 edition, 2006.