

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA

AUTOMATIZACIÓN DE UNA ELECTROVÁLVULA DE FLUJO DE GAS
LICUADO DE PETRÓLEO

AUTOR

KEVIN MARCELO RUIZ BOLAÑOS

DIRECTOR

ING. MILTON ALEJANDRO GAVILÁNEZ VILLALOBOS

Ibarra-Ecuador

2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento al Art. 144 de la ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100365349-8		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Ruiz Bolaños Kevin Marcelo		
DIRECCIÓN:	Atuntaqui – Imbabura		
EMAIL:	kmruiz@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062-910-149	TELÉFONO MÓVIL:	0980209316

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	AUTOMATIZACIÓN DE UNA ELECTROVÁLVULA DE FLUJO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO
AUTOR:	Ruiz Bolaños Kevin Marcelo
FECHA:	04-07-2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR:	Ing. Milton Gavilanes

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra, objeto de la presente autorización, es original y se la desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 4 días del mes de Julio del 2019



Firma

Nombre: Kevin Marcelo Ruiz Bolaños

Cédula: 100363530 - 5



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “AUTOMATIZACIÓN DE UNA ELECTROVÁLVULA DE FLUJO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO”, presentado por el egresado Kevin Marcelo Ruiz Bolaños, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, julio de 2019

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Miltón Gavilanes', is written over a solid horizontal line.

Ing. Miltón Gavilanes

DIRECTOR DE TESIS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo, Ruiz Bolaños Kevin Marcelo, con cédula de identidad Nro. 100363530-5 declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ibarra, julio de 2019

Firma

Nombre: Kevin Marcelo Ruiz Bolaños

Cédula: 100363530 - 5

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios que me ha brindado la fuerza necesaria, la salud y por haber cuidado de mí durante todos los años de mi vida.

De igual manera agradezco a mis padres Martha y Marcelo que me han apoyado en todas las decisiones y me han sabido guiar con amor por el camino correcto, para ser un buen hombre.

A mi padrastro Luis, quien ha sido una guía y ejemplo a seguir, que ha estado conmigo en las buenas y malas confrontando a mi lado las acciones ejercidas por mí.

A mis abuelos que, gracias a su bondad, nobleza, afecto y me han enseñado grandes valores para servir a la sociedad.

A mis amigos de carrera que me han apoyado en esta etapa de mi vida, en la cual han estado presentes para darme apoyo y ánimo y sobre salir adelante.

Kevin Ruiz Bolaños

DEDICATORIA

Dedico en primer lugar a la persona que más amo en este mundo, mi madre, quien a pesar de mis errores ha sabido estar para mí brindándome su amor y cariño y dedico a mis hermanos que Jordán, Jonathan y Lucy que me han inspirado y enseñado un amor que simplemente es tan grandioso que las palabras quedan cortas.

Kevin Ruiz Bolaños

RESUMEN

Este proyecto contiene información acerca de la elaboración de un actuador que permita el paso controlado de combustible que circula sobre la instalación de ingreso hacia el interior de los quemadores de una máquina a gas. Esto permite la optimización de tiempo hacia los operarios ya que el resultado final da el valor deseado de temperatura, por consiguiente, este sistema acelera los procesos de producción en hornos, cafeteras, máquinas tostadoras, dosificadoras, extractores de esencias entre otros.

La electroválvula permite realizar la comunicación con tres diferentes protocolos, siendo uno de ellos de: 0 a 10 V, otra comunicación de 4 a 20 mA y mediante el protocolo RS-485, a ello se une la posibilidad de ser manipulada de manera manual, si en caso fuese necesario.

Se detalla esquemas de circuitos eléctricos, piezas mecánicas transmisión de potencia de engranajes, hay que mencionar que se detalla el modo de calcular cada uno de los componentes para elaboración o adquisición que se ha escogido.

ABSTRACT

This project contains information about the development of an actuator that allows the controlled passage of fuel that circulates on the intake installation to the interior of the burners of a gas-powered machine. This allows the optimization of time to the operators since the final result gives the desired value of temperature, therefore, this system accelerates the production processes in ovens, coffee machines, toasting machines, dosing machines, essence extractors among others.

The solenoid valve allows the communication with three different protocols, one of them being: 0 to 10 V, another communication of 4 to 20 mA and through the RS-485 protocol, to this is added the possibility of being manipulated manually, if it were necessary.

Details of electrical circuits, mechanical parts, transmission of power of gears are detailed, it is necessary to mention that the way of calculating each one of the components for elaboration or acquisition that has been chosen is detailed.

ÍNDICE GENERAL

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
CONSTANCIAS.....	III
CERTIFICACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XX
CAPÍTULO I.....	- 1 -
1.1 Descripción del problema.....	- 1 -
1.2 Objetivo General	- 1 -
1.2.1 Objetivos Específicos	- 1 -
1.3 Alcance.....	- 2 -
1.4 Justificación.....	- 2 -
CAPÍTULO II.....	- 3 -
2.1 El GLP y el GN	- 3 -
2.2 Gas Licuado de Petróleo (GLP)	- 4 -
2.2.1 Composición del GLP	- 5 -
2.2.2 Características del GLP	- 6 -

2.2.2.1 Estado	- 6 -
2.2.2.2 Suministro	- 6 -
2.2.2.3 Corrosión.....	- 6 -
2.2.2.4 Densidad y viscosidad.....	- 7 -
2.2.2.5 Combustión	- 7 -
2.2.2.6 Contaminación	- 7 -
2.2.2.7 Auto ignición.....	- 7 -
2.2.2.8 Máxima exposición permisible para las personas	- 7 -
2.2.3 Consumo per Cápita del GLP en Iberoamérica.....	- 8 -
2.3 Válvulas.....	- 8 -
2.3.2 Tipos de válvulas para gas.	- 9 -
2.3.2.1 Válvula de globo.	- 9 -
2.3.2.2 Válvula en ángulo.....	- 10 -
2.3.2.3 Válvula de diafragma.	- 11 -
2.3.2.4 Válvula tipo aguja.	- 12 -
2.4 Automatización industrial.	- 12 -
2.5 Motores de control.	- 13 -
2.5.1 Motor a pasos.	- 13 -
2.5.1.1 Motor a pasos unipolar	- 15 -
2.5.1.2 Motor a pasos bipolar	- 16 -
2.5.2 Servomotor.	- 16 -
2.5.3 Comparativa entre motor a pasos con servomotor.	- 18 -

2.5.3.1 Características y complejidad.....	- 18 -
2.5.3.2 Suavidad.....	- 19 -
2.5.3.3 Precisión.....	- 19 -
2.5.3.4 Tamaño y peso.....	- 19 -
2.5.3.5 Conclusiones del motor a pasos y el servomotor.....	- 19 -
2.6 Engranajes.....	- 20 -
2.6.1 Tren de engranajes.....	- 22 -
2.7 Encoder.....	- 23 -
2.7.1 Encoder KY-040.....	- 23 -
2.8 Variaciones analógicas.....	- 24 -
2.8.1 Divisor de voltaje.....	- 24 -
2.8.2 Conversor de corriente a voltaje.....	- 25 -
2.9 Protocolo RS-485.....	- 26 -
2.9.1 Características mecánicas RS-485.....	- 26 -
2.9.2 Características eléctricas RS-485.....	- 27 -
2.9.3 Tipos de configuraciones de 485.....	- 27 -
2.9.3.1 Simplex.....	- 27 -
2.9.3.2 Half dúplex.....	- 27 -
2.9.3.3 Full dúplex.....	- 28 -
CAPÍTULO III.....	- 29 -
3.1 Diseño y selección del mecanismo.....	- 29 -
3.1.1 Introducción.....	- 29 -

3.1.2	Diseño y selección del sistema mecanismo.....	- 29 -
3.1.3	Diagrama funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.	- 29 -
3.1.4	Descomposición funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP. .-	
	30 -	
3.1.4.1	Suministro de GLP.....	- 30 -
3.1.4.2	Suministrar energía	- 30 -
3.1.4.3	Accionamiento de la válvula.....	- 31 -
3.1.4.4	Regulación del flujo de GLP	- 31 -
3.1.5	Matriz morfológica.....	- 31 -
3.2	Selección de Alternativas	- 32 -
3.2.1	Selección del motor.....	- 32 -
3.2.1.1	Matriz de priorización de parámetros para el motor.....	- 33 -
3.2.2	Selección del mecanismo de transmisión de potencia.	- 36 -
3.2.2.1	Matriz de priorización de parámetros para la selección del mecanismo de transmisión de potencia.....	- 37 -
3.2.3	Selección de la válvula.....	- 40 -
3.2.3.1	Matriz de priorización de parámetros para el motor.....	- 40 -
3.2.4	Propuesta final.....	- 43 -
3.3	Diseño.....	- 43 -
3.3.1	Cálculos del sistema de mecánico.....	- 43 -
3.3.1.1	Cálculo del tren de engranajes	- 43 -
3.3.1.2	Cálculo del torque	- 50 -

3.3.2 Cálculo del caudal.	- 52 -
3.3.3 Piezas del sistema mecánico	- 53 -
3.3.3.1 Armazón	- 53 -
3.3.3.2 Base de la válvula.....	- 54 -
3.3.3.3 Engrane menor.	- 55 -
3.3.3.3 Engrane mixto.	- 55 -
3.3.3.4 Engrane mayor	- 56 -
3.3.3.7 Tapa intermedia.....	- 56 -
3.3.3.8 Tapa superior.....	- 57 -
3.3.3.9 Válvula de aguja.....	- 57 -
3.3.3.8 Servomotor	- 58 -
3.3.3.9 Encoder.....	- 58 -
3.3.4 Diseño del sistema eléctrico.	- 59 -
3.3.4.1 Esquema del convertor de voltaje	- 59 -
3.3.4.2 Cálculo del convertor de voltaje.	- 59 -
3.3.4.3 Simulación del esquema del convertor de voltaje.	- 61 -
3.3.3.4 Esquema del convertor de corriente.....	- 62 -
3.3.3.5 Cálculo del convertor de corriente.	- 62 -
3.3.3.6 Esquema del protocolo RS-485.....	- 63 -
3.3.3.6 Cálculo del protocolo RS-485.	- 63 -
CAPÍTULO IV	- 64 -
4.1 Curva característica de la válvula.....	- 64 -

4.3 Resultados de la comunicación análoga y digital.....	- 65 -
CAPÍTULO V.....	- 69 -
5.1 Conclusiones	- 69 -
5.2 Recomendaciones.....	- 70 -
ANEXOS	- 71 -
Anexo 1. Datos para la curva característica de la válvula de aguja.	- 71 -
Anexo 2. Especificaciones del sensor de flujo.	- 72 -
Anexo 3. Dimensiones mecánicas del sensor de flujo.	- 73 -
Anexo 4. Componentes del sensor de flujo.....	- 73 -
Anexo 5. Curva característica del sensor de flujo	- 74 -
Anexo 6. Diagrama de conexión.....	- 74 -
Anexo 7. Características del Max 485	- 75 -
Anexo 8. Esquema del Max 485	- 75 -
Anexo 9. Configuración del motor a pasos unipolar (por olas).	- 75 -
Anexo 10. Configuración del motor a pasos unipolar (pasos medios).....	- 76 -
Anexo 11. Configuración del motor a pasos bipolar (pasos completos).....	- 77 -
Anexo 12. Configuración del motor a pasos bipolar (pasos medios).....	- 77 -
Anexo 13. Marcas de Servomotores	- 78 -
Anexo 14. Esquema electrónico.....	- 79 -
Anexo 15. Ilustración de la placa de control	- 79 -
Anexo 16. PCB de la placa.....	- 80 -
Anexo 17. Masa requerida para los cálculos del torque.....	- 80 -

Anexo 18. Pruebas de calibración de la comunicación de corriente..... - 81 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físico químicas del GN y el GLP	3
Tabla 2. Tipos de engranajes	20
Tabla 3. Proceso de ingreso del gas licuado de petróleo	30
Tabla 4. Procesos de suministro de energía	30
Tabla 5. Procesos de accionamiento.....	31
Tabla 6. Procesos de regulación	31
Tabla 7. Matriz morfológica.....	31
Tabla 8. Matriz de priorización para la selección del motor	33
Tabla 9. Evaluación de las soluciones con respecto a la exactitud	33
Tabla 10. Evaluación de las soluciones con respecto al torque.....	34
Tabla 11. Evaluación de las posibles soluciones con respecto al costo	34
Tabla 12. Evaluación de las posibles soluciones con respecto a la disponibilidad	35
Tabla 13. Evaluación de las posibles soluciones con respecto al tamaño	35
Tabla 14. Selección del motor	36
Tabla 15. Matriz de priorización para el mecanismo de transmisión de potencia	37
Tabla 16. Evaluación de las soluciones de transmisión de potencia con respecto al mantenimiento.....	38
Tabla 17. Evaluación de las soluciones de transmisión de potencia con respecto a la manufactura.....	38

Tabla 18. Evaluación de las posibles soluciones de transmisión de potencia con respecto a la funcionalidad.....	38
Tabla 19. Evaluación de las posibles soluciones de transmisión de potencia con respecto al costo	39
Tabla 20. Selección del mecanismo de transmisión de potencia	39
Tabla 21. Matriz de priorización para la selección de la válvula	41
Tabla 22. Evaluación de las soluciones con respecto a la estrangulación.....	41
Tabla 23. Evaluación de las soluciones con respecto a la disponibilidad	42
Tabla 24. Evaluación de las soluciones con respecto al costo	42
Tabla 25. Selección de la válvula.....	43
Tabla. 26. Tamaño del addendum y dedendum para los dientes de un engrane	47
Tabla. 27. Resultado en función de las vueltas de la válvula.....	65
Tabla. 28. Resultado de la comunicación de voltaje	65
Tabla. 29. Resultado de comunicación de la corriente.....	66
Tabla. 30. Resultado del modo de control manual	67
Tabla. 31. Resultado de la comunicación RS-485.....	68
Tabla. 32. Datos recolectados para obtener la curva característica.....	71
Tabla. 33. Especificaciones del sensor de flujo.....	72
Tabla. 34. Componentes del sensor de flujo	73
Tabla. 35. Especificaciones técnicas del MAX 485	75

Tabla 36. “Motor Unipolar. Orden de encendido de los transistores “por olas”” 76

Tabla 37. “Motor Unipolar. Orden de encendido de los transistores medios pasos” 76

Tabla 38. “Motor Bipolar. Orden de encendido de los transistores pasos normales” 77

Tabla 39. “Motor Bipolar. Orden de encendido de los transistores medios pasos” 78

Tabla 40. Características Técnicas de algunas marcas de servo 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Molécula de propano	5
Figura 2. Molécula de butano	5
Figura 3. Consumo per cápita en Iberoamérica	8
Figura 4. Válvula de globo de simple asiento	9
Figura 5. Válvula de globo de doble asiento	9
Figura 6. Válvula de globo de obturador equilibrado	10
Figura 7. Esquema de una válvula de ángulo	10
Figura 8. Esquema de una válvula de diafragma	11
Figura 9. Esquema de una válvula de aguja	12
Figura 10. Motor Nema 17	14
Figura 11. “Diagrama de un motor de pasos de 4 devanados.”	14
Figura 12. Diagrama de motor de pasos unipolar de cinco, seis y ocho cables	15
Figura 13. “Diagrama de motor de pasos. Motor unipolar seis”	15
Figura 14. Diagrama de motor de pasos bipolar	16
Figura 15. “Diagrama de motor de pasos. Motor bipolar. Circuito de control tipo “H”	16

Figura 16. S3003 Servomotor	17
Figura 17. “Ejemplos de posicionamiento de un servo”	17
Figura 18. Composición interna de un servomotor	18
Figura 19: Tipos de engranajes	22
Figura 20: Tren de engranaje simple	22
Figura 21: Tren de engranaje compuesto	23
Figura 22. Ilustración representativa del interruptor KY-040.....	24
Figura 23. Ejemplos esquemáticos de divisores de voltaje.....	25
Figura 24. Circuito básico de un conversor de corriente a voltaje con salida invertida	26
Figura 25. Circuito básico de un conversor de corriente a voltaje con salida no invertida	26
Figura 26: Ilustración de los sistemas de transmisión: simplex, semidúplex y dúplex	28
Figura 27. Diagrama funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.....	29
Figura 28: Descomposición funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP	30
Figura 29. Armazón	54
Figura 30. Base de la válvula	54
Figura 31. Engrane menor	55
Figura 32. Engrane mixto.....	55
Figura 33. Engrane mayor	56
Figura 34. Tapa intermedia	56

Figura 35. Tapa superior	57
Figura 36. Válvula de aguja	57
Figura 37. Servomotor	58
Figura 38. Encoder	58
Figura 39. Esquema del conversor de voltaje	59
Figura 40. Simulación del conversor de voltaje.....	61
Figura 41. Esquema del conversor de corriente	62
Figura 42. Esquema del MAX 485	63
Figura 43. Curva característica de la válvula de aguja.....	64
Figura 44. Vista superior del sensor de flujo	73
Figura 45. Sección transversal del sensor de flujo	73
Figura 46. Curva característica del sensor de flujo	74
Figura 47. Diagrama de conexión	74
Figura 48. Esquema interno del MAX 485	75
Figura 49. Esquema electrónico	79
Figura 50. Ilustración de la placa de control	79
Figura 51. Ilustración del PCB la placa de control	80
Figura 52. Valor de la masa requerida para el torque	80
Figura 53. Calibración de la corriente con dos multímetros	81

CAPÍTULO I

1.1 Descripción del problema

Los procesos que requieren de flujo de gas son realizados por medio de válvulas de mariposa o de estrangulación. Con el avance de la automatización se prefiere utilizar electroválvulas, que tienen un mayor control y mejor fiabilidad en los procesos. En la actualidad el uso de gas licuado de petróleo (GLP) en el domicilio, en el comercio o en la industria requiere contar con una red de instalación de conducción desde la fuente de suministro hasta el punto de consumo.

Las máquinas utilizadas en la pequeña industria y artesanales que funcionan con GLP poseen una conexión con válvulas manuales, por la cual circula un flujo de caudal que tiene que ser regulado por un operario. Este no asegura la precisión deseada y además agrega tiempo extra probando experimentalmente la cantidad requerida para que la llama genere la temperatura deseada en el cilindro.

Los esquemas de automatización y sistemas de seguridad permiten la implementación de un modelo de electroválvula que trabaje en una planta realizando el control de flujo adecuado de GLP para solventar las necesidades requeridas por la máquina. Así la temperatura a usarse requiere de una cantidad justa de gas, por lo que hay la necesidad de implementar una electroválvula que automatice el proceso manual.

1.2 Objetivo General

Automatizar una válvula de regulación de flujo de GLP

1.2.1 Objetivos Específicos

- Seleccionar la válvula de control de flujo que se automatizará.
- Determinar las características mecánicas, eléctricas y electrónicas del sistema a desarrollar.
- Diseñar un sistema que permita automatizar la válvula.

- Validar el dispositivo a través de experimentos.

1.3 Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad automatizar una electroválvula que permita regular el paso de gas hacia el interior de la máquina en donde se encuentran los quemadores o flautas de gas. De esta manera se regulará el tamaño de la flama y por consiguiente la temperatura en el interior del cilindro de la máquina.

1.4 Justificación

Este proyecto va a realizarse porque existe la necesidad de mejorar el control de la cantidad de combustible que circula en la red de instalación y en el ingreso hacia el interior de los quemadores o flautas en las máquinas.

Además, al tener un control preciso, se optimiza el tiempo de calentamiento deseado por los operarios/propietarios. Ellos son beneficiados directamente al dejar de realizar este proceso manual que puede conllevar a ciertos riesgos implícitos en el ajuste erróneo de la temperatura.

Con la implementación de este sistema se acelerará el proceso de producción, lo que significa acortar tiempos y realizar más productos. Por otro lado, los operarios serán favorecidos al dejar de lado la revisión y manipulación constante de la flama hasta obtener el tamaño deseado. Algunas aplicaciones en las que se ha considerado útil la implementación de esta válvula son: máquinas tostadoras de café, dosificadoras de azúcar, extractores de esencias, hornos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 El GLP y el GN

El gas licuado de petróleo y el gas natural (GN) provienen de depósitos geológicos, es decir son combustibles fósiles; ya que los materiales de los que se encuentran compuestos son orgánicos que fueron transformados en petróleo crudo, carbón, gas natural, aceites como resultado de una putrefacción entre animales y plantas que durante millones de años estuvieron expuestos a la presión, temperatura y otros parámetros de la corteza terrestre. [1].

Las diferencias principalmente se las realiza en los procesos de producción, la comercialización y el transporte lo que conlleva a una notable incidencia en los precios para el comprador. [1].

A continuación, en la *tabla 1* se detallan características físico-químicas del gas licuado de petróleo y del gas natural.

Tabla 1.

Características físico químicas del GN y el GLP.

Propiedad	Gas Natural	GLP
Composición	90% Metano	60% Propano 40% Butano
Fórmula Química	CH ₄	C ₄ H ₁₀ C ₃ H ₈
Gravedad Específica	0,60	2,05 1,56

Poder calorífico	9200 Kcal/m ³	22244 Kcal/m ³ 6595 Kcal/lt 11739 Kcal/Kilo
Presión de suministro	21 mbar	50 mbar
Estado físico	Gaseoso sin límite de compresión. Líquido a -160°C a presión atmosférica.	Líquido a 20°C con compresión manométrica de 2,5 bar.
Color / olor	Incoloro / Inodoro	Incoloro / Inodoro

Fuente: [1]

2.2 Gas Licuado de Petróleo (GLP)

La historia del GLP en comparación con la industria del petróleo y el gas es desarrollada relativamente tarde ya que se encuentra documentada en el siglo XX, puesto que en esa época la gasolina que se almacenaba, se vaporizaba rápidamente lo que resultaba siendo un problema. Walter Snelling demostró en 1911 que dicha evaporización se debía al propano y butano que se encuentra en su composición. [2]

En los años 20 se realizó la primera aplicación de producción de GLP, y a mediados de los años 30 una petrolera en Francia introdujo este gas. De igual manera en Italia se construyó una planta de embotellamiento para la distribución. No es hasta los años 50 que varias compañías empezaron a fabricar los cilindros de GLP para los domicilios que se comercializaban bajo una licencia. [2]

En la actualidad se utiliza este gas para un sinnúmero de aplicaciones diversas en sectores como: la industria, el transporte, la agricultura, la generación de energía, para cocinar,

combustible para la calefacción y en aplicaciones recreativas. Siendo este, el combustible más utilizado por la humanidad. [2].

2.2.1 Composición del GLP

La composición principal del gas licuado de petróleo es de moléculas de propano (*figura 1*) y moléculas de butano (*figura 2*), además de un ligero porcentaje de otros compuestos. El GLP es inoloro e incoloro, es por esta razón que se añade un agente odorizante que permita ser detectado con facilidad para evitar fugas y percances. [2].

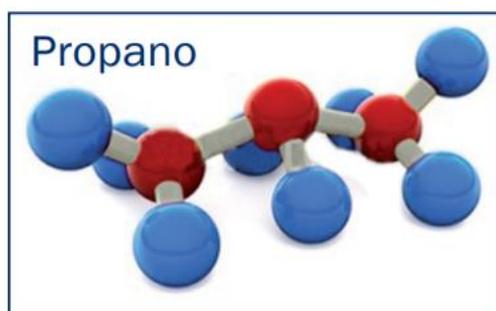


Figura 1. Molécula de propano.

Fuente: [1]

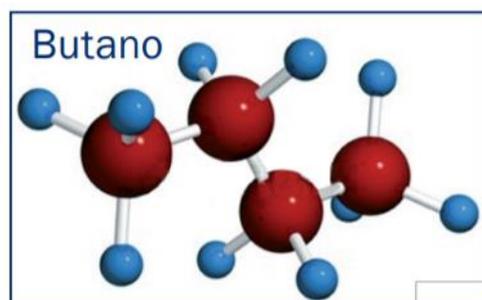


Figura 2. Molécula de butano.

Fuente: [1]

Existen dos tipos de GLP para el uso comercial que en el mercado se los conoce como Propano (propano comercial) y Butano (butano comercial). “El propano comercial es una mezcla de propano, propileno y otros compuestos minoritarios (etano, butano, etc.). Puede tener hasta un máximo de 30% de butano. El butano comercial es una mezcla de butano, butilenos y otros compuestos minoritarios (propano, pentanos, etc.). Puede tener un máximo de 50% de propano” [3].

2.2.2 Características del GLP

Las características principales que posee el gas licuado de petróleo se presentan a continuación:

2.2.2.1 Estado

El estado en el que se encuentra el gas licuado de petróleo a temperatura ambiente (20°C) y bajo la presión atmosférica (1 atmósfera) es en estado gaseoso, si se necesita tener el GLP en estado líquido bajo la presión atmosférica la temperatura del butano debe ser menor a -0,5°C y la temperatura del propano a -42,2°C. Por otro lado, para lograr obtener el GLP en estado líquido a temperatura ambiente, es necesario que este se encuentre sometido bajo una presión de: 2 atmosferas para el butano y 8 atmosferas para el propano. [3]

La equivalencia de un litro líquido de GLP es: 237,8 litros de gas para el butano y 272,6 litros de gas para el propano. [3].

2.2.2.2 Suministro

El almacenamiento de este combustible es realizado en cilindros o bombonas en estado líquido introducido a presión y posteriormente comercializado al público. El GLP también puede ser suministrado mediante tuberías, pero esto conlleva a un considerable aumento en el precio del producto final, esta es la razón para ser expendida mediante cilindros que se conectan mediante un regulador y una manguera a los diferentes equipos. [1].

2.2.2.3 Corrosión

El gas licuado de petróleo tiene la característica de no corroer el acero, el cobre ni sus aleaciones, además tampoco disuelve los cauchos sintéticos, siendo materiales perfectos para la utilización de el mismo. [1].

2.2.2.4 Densidad y viscosidad

La densidad y peso específico del GLP es casi tres veces mayor que del aire, siendo mucho más pesado, y al exponerse uno con el otro el GLP se acumula en la parte baja a nivel del suelo. El GLP líquido es menos viscoso que el agua y más liviano, por lo que puede pasar a través de poros que el agua, gasoil o kerosene pueden atravesar. [1], [3].

2.2.2.5 Combustión

La combustión generada por esta combustible, da un resultado de llama de color azulada lo que señala ser una buena combustión, una combustión de color rojiza indica una mala combustión. Para asegurar el implemento de hidrocarburos, los lugares que manejen aparatos con funcionamiento de GLP, deben tener una adecuada y suficiente ventilación. [1] .

2.2.2.6 Contaminación

Este combustible es muy amigable con la naturaleza ya que al ser utilizado en una combustión no intoxica a la atmosfera, puesto que este gas no contiene en su composición azufre, plomo ni sus óxidos por lo que es un gas ecológico que posee una combustión limpia que no produce ningún olor ni residuos como hollín ni humos; ya que los PDC dan como resultado CO_2 y H_2O . Esto da lugar a que el GLP sea ideal para ser utilizado en embarcaciones ya sea como carburante o como combustible ya que este gas no se mezcla ni contamina el agua. [4].

2.2.2.7 Auto ignición

El gas licuado de petróleo necesita alcanzar una temperatura de 450°C para explotar. [1].

2.2.2.8 Máxima exposición permisible para las personas

Las personas pueden percibir como exposición máxima 1000 partes de GLP por cada 1000000 partes de aire (1000ppm), en un promedio de turno de trabajo de 8 horas. [3].

2.2.3 Consumo per Cápita del GLP en Iberoamérica

En la *figura 3*, se puede observar en consumo anual de gas licuado de petróleo por habitante en Iberoamérica. Siendo el país más destacado Venezuela con 160Kg de GLP por habitante, en segundo lugar, México con 120 Kg por habitante y en tercer lugar Chile y España con 80 Kg de GLP por habitante. [3].

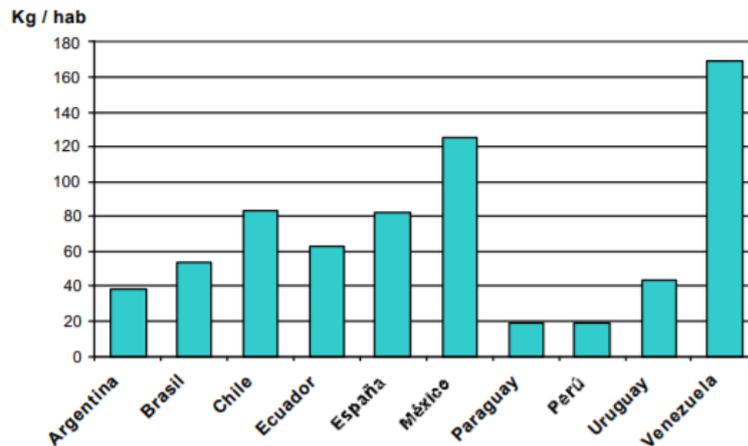


Figura 3. Consumo per cápita en Iberoamérica.

Fuente: [3].

2.3 Válvulas.

En la historia se ha ido desarrollando una mejoría en la calidad y variedad de válvulas, a tal punto que ahora en la actualidad no se encuentran las mismas válvulas que en el pasado, en la antigüedad se empleaba troncos o piedras que cumplían con la función de desviar parcial o totalmente el paso de corrientes de agua llegando hasta las actuales, modernas y con gran flexibilidad para diferentes aplicaciones que utilizan flujos de gases o líquidos. [5].

En los procesos industriales que constan de regulación de flujo ya sea líquido o gaseoso poseen válvulas que son de vital importancia en sus operaciones, ya que estas son capaces de controlar y manipular los diferentes caudales que se involucran dentro de determinado proceso, al mismo tiempo mediante las válvulas se manipula las condiciones internas de presión de los depósitos. [6].

2.3.2 Tipos de válvulas para gas.

En el mundo industrial existe una gran cantidad de variedades de válvulas, dependiendo de la aplicación a la que vaya a operar, según el tipo y espesor de fluido que regule, la presión a la que trabaje, el tamaño y lugar de instalación entre otros parámetros más. [7]

2.3.2.1 Válvula de globo.

Las válvulas de globos pueden ser de tres diseños diferentes de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado como se indica en la *figura 5, 6 y 7* respectivamente. [8]. Estas válvulas son muy utilizadas ya que permite regular el caudal del líquido, porque permite una estrangulación al grado requerido del fluido, posee un cierre positivo para el aire y otros gases, permite una operación frecuente y además la caída de presión en la línea de trabajo es tolerable. [9].

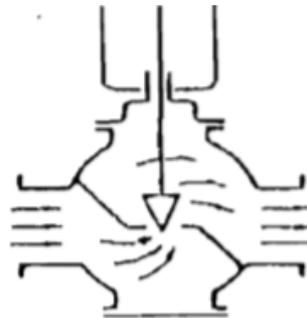


Figura 4. Válvula de globo de simple asiento.

Fuente: [8].

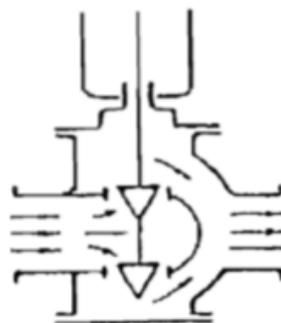


Figura 5. Válvula de globo de doble asiento.

Fuente: [8].

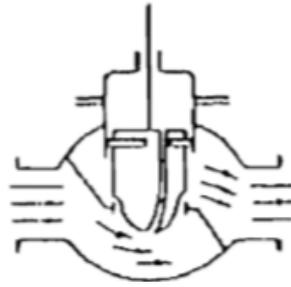


Figura 6. Válvula de globo de obturador equilibrado.

Fuente: [8].

2.3.2.2 Válvula en ángulo.

Son válvulas con una pequeña variante a las válvulas de globo, ya que tienen las conexiones de entrada y salida en ángulo recto. El diseño recto del ángulo permite ahorrarse el implemento de un codo en la parte de ingreso del fluido ya que la entrada y la salida se encuentran en ángulo recto. [9], [8].

Mediante el uso de esta válvula se logra obtener flujos de caudal regulares, casi sin la presencia de turbulencia al mismo tiempo son excelentes para atarearse en servicios de estrangulación sin presentar gran resistencia a la corriente de flujo y es idónea para trabajar en ambientes con grandes presiones diferenciales, para fluidos que contienen sólidos en suspensión y para el control de fluidos que se vaporizan. [9], [8].

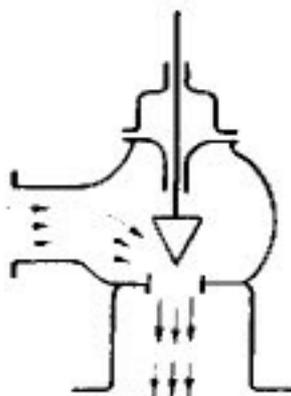


Figura 7. Esquema de una válvula de ángulo.

Fuente: [8].

2.3.2.3 Válvula de diafragma.

Este tipo de válvula permite tener un excelente servicio a la hora de controlar o regular los líquidos, es por esta razón que sirve para aplicaciones ya sea de corte o estrangulación. El diafragma que tienen estas válvulas obstaculiza el roce entre el líquido que circula con las piezas del mecanismo de la misma, de esta manera se previene la corrosión que provoca fallas en el servicio. [7]

La peculiaridad que se realiza al encontrarse la válvula en modo abierto, es que el diafragma que se encuentra en el interior se eleva, dando paso al movimiento del fluido, siendo una corriente de flujo suave y sin alguna obstrucción; en caso contrario al encontrarse esta en modo cerrado, con rigidez el diafragma se asienta contra un vertedero en el fondo de la válvula. [9].

Se puede emplear en trabajos que sean expuestos a bajas presiones y se especializan controlando fluidos pastosos agudados que normalmente en otro tipo de válvulas ocasionarían entorpecimientos u obstrucciones y corrosión. La vida útil está dada por la frecuencia de apertura y cierre, la presión y temperatura a la que sean sometidas. [9].

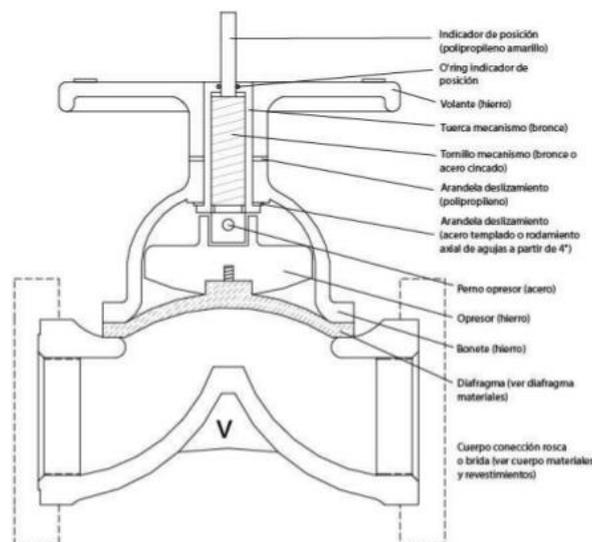


Figura 8. Esquema de una válvula de diafragma.

Fuente: [10].

2.3.2.4 Válvula tipo aguja.

Estas válvulas se consideran una modificación de las válvulas de globo con la diferencia de que poseen machos cónicos de geometría similar a las agujas, estas se ajustan con precisión en sus asientos, cuando se abren, el vástago interno gira en sentido en contra a las manecillas del reloj y se mueve hacia afuera. La estrangulación que se obtiene a partir de esta regulación es muy exacta en volúmenes pequeños, esto se logra gracias al orificio que va variando dependiendo de los giros que realiza el vástago. Se utilizan por lo habitual como válvulas para instrumentos o en sistemas hidráulicos, no obstante, no es recomendable para altas temperaturas. [9]

Su fabricación se elabora en materiales como: acero inoxidable, bronce, latón y algunas aleaciones derivativas. En los extremos existe la presencia de un roscado para la tubería, y los tamaños que se encuentran en el mercado van de 1/8 a 1 in. [9].

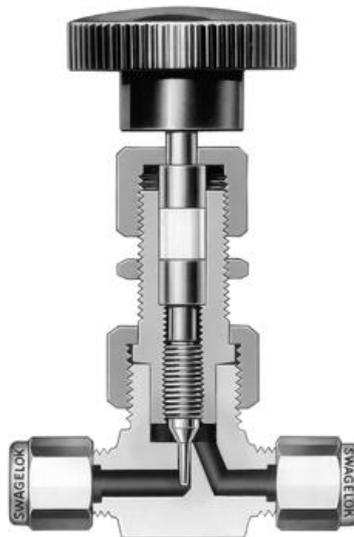


Figura 9. Esquema de una válvula de aguja.

Fuente: [11]

2.4 Automatización industrial.

La automatización industrial es el control de maquinarias o procesos industriales a partir de sistemas computacionales y elementos computarizados para la sustitución de seres humanos

operarios. Aunque puede sonar sencillo, la automatización va más allá que una simple mecanización de los procesos; ya que este provee al técnico mecanismos para auxiliar en el trabajo al momento de ejecutar esfuerzos físicos. [12]

Además, la automatización da lugar a la disminución de la necesidad sensorial y mental de las personas en el ámbito laboral, no es únicamente un sistema de control, ya que al ser parte de una ingeniería abarca también instrumentación industrial, sensores, transmisores de campo, sistemas de control, supervisión, control de operaciones de planta, transmisión y recolección de datos, aplicación de software en tiempo real, etc. [12]

Cabe recalcar que no existe algún dispositivo capaz de igualar la precisión y certeza que posee el ojo del ser humano en muchas tareas, ni el oído humano. Por más eficiente que sea el instrumento automático no es capaz de identificar ni distinguir de mejor manera que una persona, incluyendo el patrón de reconocimiento humano, reconocimiento de lenguaje y producción de lenguaje. [12]

2.5 Motores de control.

Se ha tomado en cuenta los motores principales que permiten realizar labores de precisión en aplicaciones industriales, robóticas, médicas y alimenticias.

2.5.1 Motor a pasos.

Los motores a pasos o también conocidos como motores paso a paso no son más que una máquina eléctrica que consta con bobinados los cuales se energizan uno a continuación del otro, al recibir cada bobina excitaciones con impulsos; operan sobre un núcleo de hierro dulce o imán con un determinado tiempo y en serie, da lugar a que se origine un giro del eje, este giro es determinado por cada impulso de entrada. [13]

Son motores que convierte la información digital en movimientos mecánicos y el posicionamiento que se obtiene es preciso y fiable, cabe recalcar que el sentido de giro que

ejecute depende del sentido de excitación de las bobinas. La velocidad en la que gira el motor a pasos [N] está dada en revoluciones por minuto, y se puede determinar mediante la ecuación 2.1. [13]

$$N = \frac{60 * f}{n} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

f = frecuencia de los impulsos.

n = número de bobinas.



Figura 10. Motor Nema 17.

Fuente: [14]

A continuación, se observa en la figura 20 un esquema de un motor a pasos, en este caso cuenta con 4 devanados “están enrollados de manera que el sentido de la corriente tenga una dirección específica que de acuerdo con la Ley de Lorentz se generara un polo norte siempre que exista circulación de corriente a través del transistor” [15].

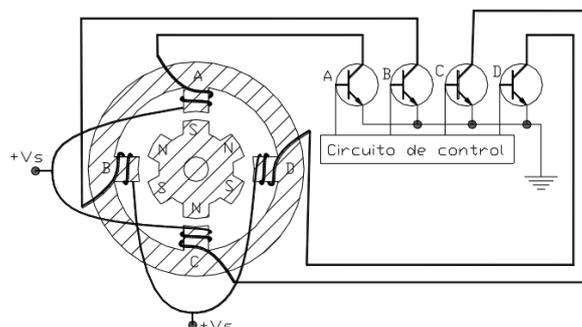


Figura 11. “Diagrama de un motor de pasos de 4 devanados.”

Fuente: [15].

2.5.1.1 Motor a pasos unipolar

Los motores paso a paso que son de tipo unipolar puede ser de cinco, seis y ocho terminales; la diferencia de cada una de las configuraciones se puede observar en la *figura 21*.

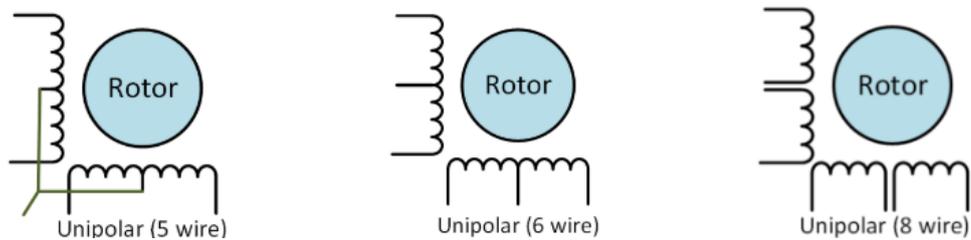


Figura 12. Diagrama de motor de pasos unipolar de cinco, seis y ocho cables.

Fuente: [16].

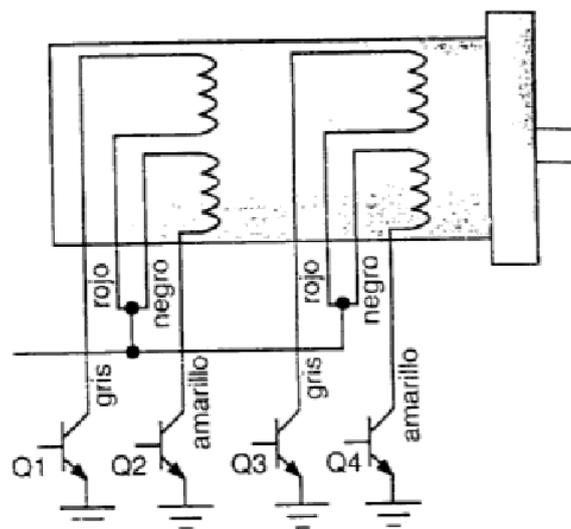


Figura 13. "Diagrama de motor de pasos. Motor unipolar seis".

Fuente: [15]

En este tipo de motores el circuito de control es mucho más sencillo que en uno de tipo bipolar, ya que circula la corriente en una sola dirección, se logra variando la configuración de los transistores entre encendido y apagado como se muestra en los anexos en las *tablas 32 y 33*.

2.5.1.2 Motor a pasos bipolar

Esta configuración del motor requiere de doble polaridad para el control, se necesita alimentar con un voltaje positivo para un paso y con un negativo para otro paso en el mismo terminal. El diagrama del motor y el control se indica en la *figura 22*.

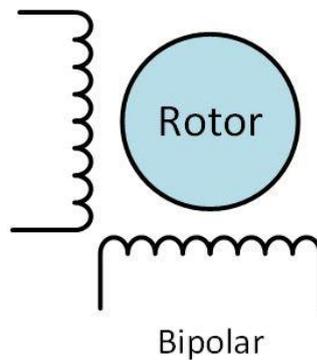


Figura 14. Diagrama de motor de pasos bipolar.

Fuente: [16].

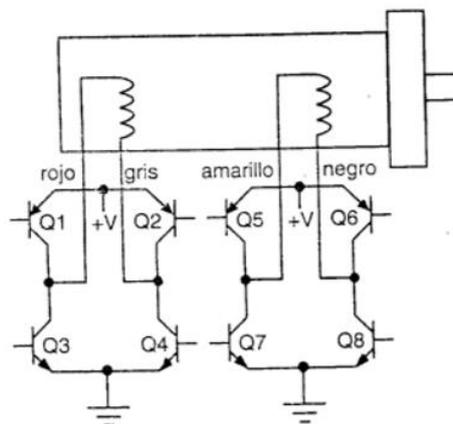


Figura 15. “Diagrama de motor de pasos. Motor bipolar. Circuito de control tipo “H”.

Fuente: [15] Tomado de la revista “Cekit”

2.5.2 Servomotor.

Un servomotor es un potente dispositivo que en su interior se encuentra un motor que tiene un eje de rendimiento controlado con diversas características, el dispositivo es capaz de moverse sobre posiciones angulares específicas al leer una señal codificada, esto se logra gracias a que su principal especialidad es el sistema de lazo cerrado por medio de un encoder, que este su vez es el que informa al controlador del servomotor (servo drive) si es correcta la

posición en la que se halla el eje del servo, y en caso de no ser corrige en tiempo real los errores de posición por lo que se consigue una alta precisión. [17].

El motor del servo tiene una caja reductora de velocidad y por consiguiente se obtiene un incremento en el par de trabajo, el rango de trabajo es de 180° o también existe la posibilidad de realiza una pequeña modificación en su interior (destruncar el servo) de esta manera se convierte en un motor estándar con giro libre de 360° . En la *figura 25* y *figura 26*, se puede apreciar un servomotor y las posiciones que dispone respectivamente. [18].



Figura 16. S3003 Servomotor.

Fuente: [19].

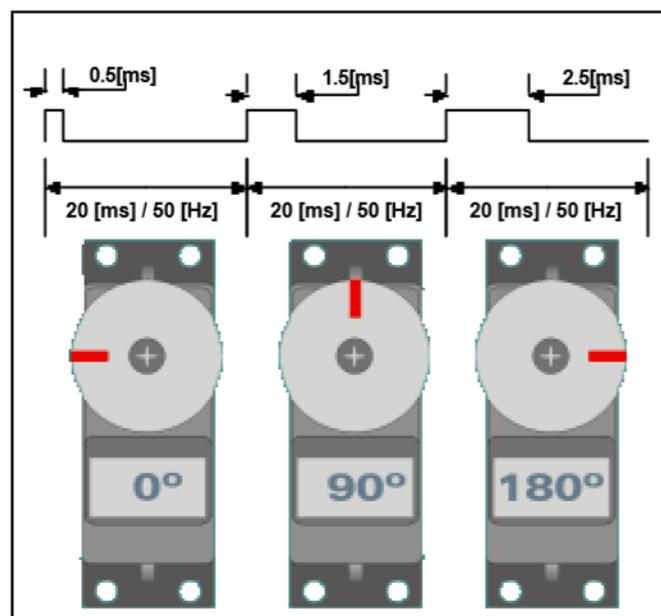


Figura 17. "Ejemplos de posicionamiento de un servo".

Fuente: [18].

En la *figura 27*. se muestra los diferentes componentes que conforman un servomotor, entre los cuales se observa: el motor, juego de engranes, la cubierta, la tarjeta de control, y el alambrado de conexión; uno para la alimentación ($V_{cc} +5\text{volts}$), otro de conexión a tierra (GND) y el tercero de control.

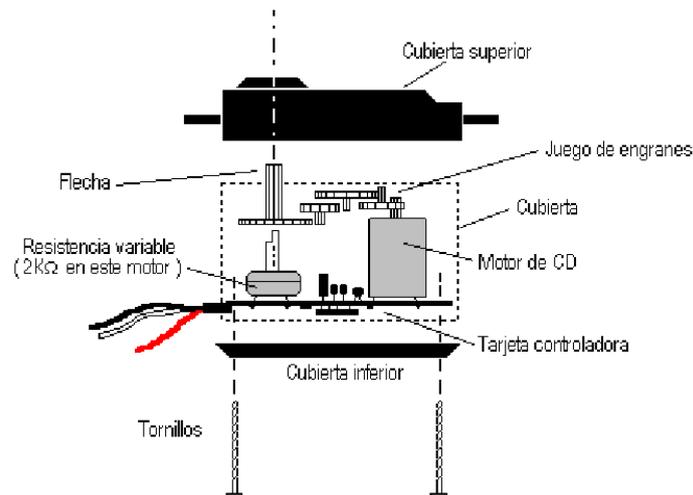


Figura 18. Composición interna de un servomotor.

Fuente: [20].

2.5.3 Comparativa entre motor a pasos con servomotor.

A continuación, se indica 4 puntos principales acerca de la selección del motor que se escoge para el uso de este proyecto.

2.5.3.1 Características y complejidad.

Los servomotores son de circuito cerrado, esto significa que el motor tiene que estar conectado a una retroalimentación que habitualmente son codificadores ópticos o de resolución, la información que se transmite indica al controlador del dispositivo la posición en la que se localiza en cualquier momento el motor y la carga. Otro parámetro que muestra es la velocidad en la que se encuentra trabajando. [13]

Por otro lado, los motores a pasos de igual manera pueden estar conectados a una retroalimentación, pero esta por lo general indica únicamente si el motor se encuentra estancado

o simplemente comprueban de que no haya sido movido de su posición debido a algún agente externo. [13].

2.5.3.2 Suavidad.

Cuando un servomotor trabaja y gira en cualquier sentido, los sofisticados lazos de control y la retroalimentación con la que cuentan estos motores, otorga a los trabajos a los que se encuentra sometido una mayor suavidad que los motores a pasos. Los sofisticados lazos de control y la retroalimentación otorgan a los servomotores una mayor suavidad en los trabajos que los motores a pasos. [13].

2.5.3.3 Precisión.

Un servomotor al tener una retroalimentación en su composición brinda un posicionamiento mayor de la precisión que un motor a pasos que comúnmente operan con lazo abierto, afectando en algunos casos significativamente la falta de precisión en operación. [13].

2.5.3.4 Tamaño y peso.

En estos aspectos un servomotor gana ventaja en muchas aplicaciones ya que son muy ligeros y de tamaño pequeño, no obstante, es necesario tomar en cuenta que los motores a pasos no requieren de un codificador por lo que son más pequeños. A pesar de que un servo es reducido en tamaño y energía, el codificador interno posee limitaciones por la electrónica y sensor óptico. [13].

2.5.3.5 Conclusiones del motor a pasos y el servomotor.

Se utiliza los motores a pasos cuando se requiere:

- “Alto par de fuerza a bajas velocidades
- Bajo costo
- Sencillez” [13]

Se emplea el uso de los servomotores cuando se necesita:

- “Par de fuerza en altas velocidades
- Tamaño compacto y poco peso
- La precisión y suavidad
- Control de lazo cerrado” [13]

2.6 Engranajes

En la *tabla 2* muestra una breve explicación de los tipos de engranes que existen, las características principales y la diferencia entre sí.

Tabla 2.

Tipos de engranajes.

Tipo de engranaje	Detalle
Engranaje recto	Son los más comunes, sencillos y económicos, no se usan en velocidades altas y no tienen carga axial.
Engranaje helicoidal	La transmisión de fuerza es más segura y uniforme, posee una fuerza de empuje axial, por lo que se requiere usar cojinetes de empuje
Engranaje en V	Los empujes que se generan son balanceados, por lo tanto no hay una carga de empuje en los cojinetes, su forma es similar a dos engranes helicoidales colocados lado a lado.
Engranaje cilíndrico dentado recto interior	Se llaman de esta manera, ya que el tallado de los dientes está en la parte interna de la rueda o corona. Se utilizan en grupos planetarios para aplicaciones como: el diferencial en los autos, los cambios de marcha entre otros.
Engranaje cónico recto	La transmisión del movimiento entre engranes forma un ángulo, poseen una forma cónica y son utilizados para

		transmitir la fuerza entre dos ejes que se intersecan en un punto.
Engranaje helicoidal	cónico	Son muy similares a los engranes anteriores en cuanto a la transmisión de movimiento, la variación se encuentra en los dientes ya que poseen un ángulo que permite un movimiento más suave.
Engranaje hipoide	helicoidal	Están formados por un piñón reductor que tiene pocos dientes y una rueda con muchos dientes, se utiliza principalmente en los autos con tracción posterior, permite un mayor contacto de los dientes del piñón con los de la corona. Se usa máquinas especiales para su mecanizado por ser muy complejo.
Engranaje cremallera	piñón-	La característica es tener los dientes al mismo tamaño y forma a lo largo de una superficie plana o barra recta. La cremallera es una barra dentada y el piñón es un engranaje cilíndrico; lo cual convierte el movimiento de rotación en lineal.
Engranaje dentada-tornillo sin fin	rueda	Consiste en un engranaje que se acopla a un tornillo, siendo que el paso del engranaje y el paso de rosca son del mismo tamaño, se usa en transmisiones de seguridad ya que son unidireccionales, es decir; el tornillo hace girar a la rueda, mas no está al tornillo.

Fuente: [21], [22], [23], [24].

En la *figura 26*, se aprecia una ilustración de los tipos de engranajes que se detallaron en la *tabla 6*, permitiendo visualizar de manera rápida y concisa los modelos que se pueden encontrar para utilizar según la aplicación que se requiera.



Figura 19: Tipos de engranajes.

Fuente: [25]

2.6.1 Tren de engranajes

El tren de engranajes es un conjunto de engranes que se acoplan de forma que el primer engrane, es decir el elemento conductor tenga un contacto directo con el elemento conducido, que este a su vez tiene contacto con el siguiente engrane y va transmitiendo el movimiento rotatorio. Cuando la transmisión que se obtiene mediante un solo par de engranes no es la requerida se opta por realizar este tipo de mecanismos. A continuación, en la *figura 20* y *figura 21*, se indica los tipos de tren de engranajes que existen. [26].

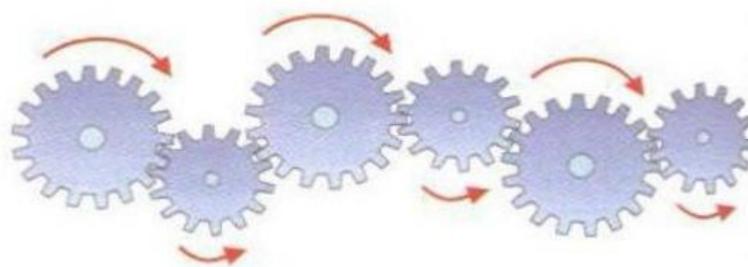


Figura 20: Tren de engranajes simple.

Fuente: [27].

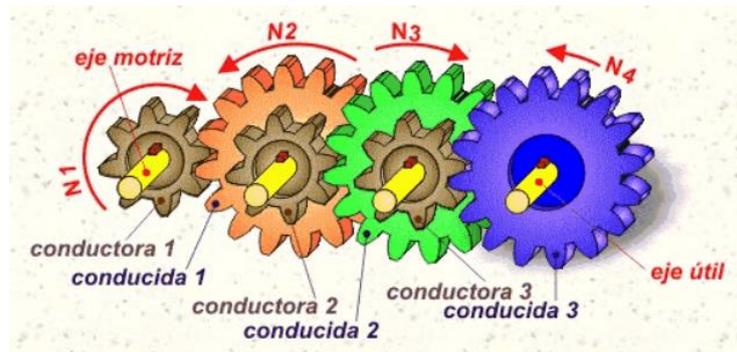


Figura 21: Tren de engranajes compuesto.

Fuente: [28].

2.7 Encoder

El siguiente punto trata acerca de los codificadores rotatorios o como más comúnmente se los conoce como encoder, ya que son instrumentos electromecánicos que proporcionan información del motor como: la velocidad, la posición y la aceleración. Los tipos de codificadores rotatorios que se encuentran con mayor frecuencia son: encoder absoluto y encoder relativo o incrementales. El primero de ellos se encuentra en el mercado con configuración ya sea binaria o gray y dentro de los incrementales, se halla el de cuadratura. [29]

Las principales aplicaciones en donde son implementados los encoder son en aplicaciones que se encuentran en la robótica, en medición angular, lentes fotográficas, procesos industriales, entre otras. [29].

2.7.1 Encoder KY-040

Este encoder permite indicar la posición y el sentido de giro mediante una perilla que posee en uno de sus lados, se utiliza a menudo para controlar servomotores y motores paso a paso otra aplicación en la que se emplea este modelo es para hacer la función de potenciómetro digital. [30]

El funcionamiento de este dispositivo se calcula mediante las 30 posiciones que posee en su interior que se puede medir fácilmente mediante “click” que existen al rotar la perilla. El encoder posee 3 pines A, B y C respectivamente, en su interior existe dos interruptores uno que

conecta A con C, y otro que conecta B con C; en la *figura 27*, se puede observar una representación de cómo se construye el interruptor. [30]

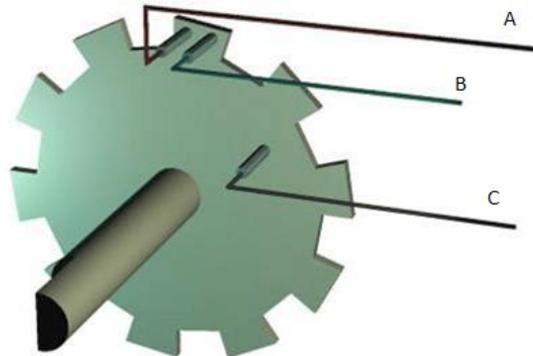


Figura 22. Ilustración representativa del interruptor KY-040.

Fuente: [30].

Mediante la anterior grafica se afirman que los dos interruptores se encuentran en estado OFF, es decir en modo cerrado, esto lleva a cabo dos posibles opciones que son:

- Si el interruptor gira hacia la derecha, el pin A y C cambian de estado de cerrado a abierto y el interruptor que contiene a B y C se mantienen en cerrado. [30]
- Si el interruptor gira hacia la izquierda, el pin B y C son los que cambian de estado de cerrado a abierto, y el interruptor de A y C se mantienen. [30]

2.8 Variaciones analógicas

Las señales analógicas son aquellas que varían a lo largo del tiempo de manera continua, considerando que representan magnitudes físicas como: temperatura, luminosidad, humedad, sonido, entre otros. [31]

2.8.1 Divisor de voltaje

Los divisores de voltajes son configuraciones de circuitos que se encarga de repartir la tensión de una fuente entre dos o más impedancias, se utiliza una resistencia con valor fijo (R_0) y otra con resistencia variable (R). [32].

Se puede elaborar un divisor de voltaje sencillo utilizando únicamente dos resistencias en serie y un voltaje de entrada dibujado de distintas formas, como se muestra en la *figura 28*.

[33]

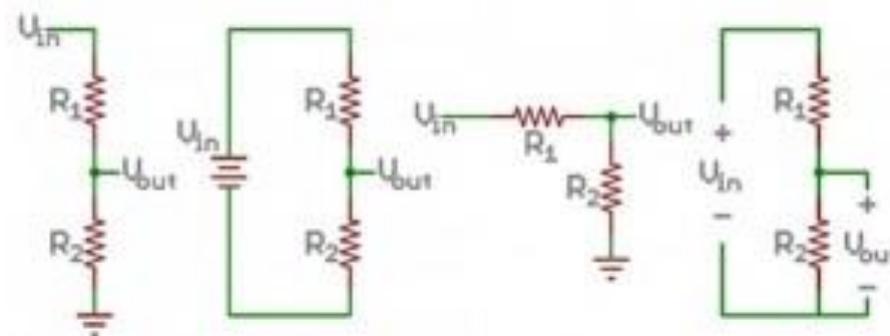


Figura 23. Ejemplos esquemáticos de divisores de voltaje.

Fuente: [33].

Existen tres puntos a considerar que son:

- Si R_1 y R_2 son iguales, el voltaje que se obtiene en la salida es la mitad del voltaje de entrada, sin importar el valor de las resistencias. [33]
- Si R_1 es mucho menor que R_2 , el voltaje que resulta en la salida es cercano al voltaje de entrada, circula muy poca tensión a través de R_1 . [33]
- Si R_1 es mucho mayor que R_2 , el voltaje del producto de este circuito arroja un valor en la salida muy pequeño en comparación al de entrada, ya que la mayor parte de la tensión a traviesa por R_1 . [33]

2.8.2 Conversor de corriente a voltaje

El amplificador de transimpedancia o más conocido como conversor de corriente a voltaje es resultado de la necesidad de elaborar fuentes de tensión constante sin depender de la carga y controlados por la corriente. Existe un circuito básico que posee la salida invertida y de igual manera un circuito básico con la salida no invertida y a continuación se muestran los diagramas respectivamente. [34]

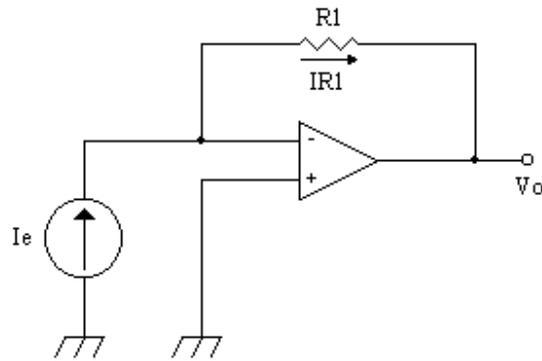


Figura 24. Circuito básico de un convertor de corriente a voltaje con salida invertida.

Fuente: [34].

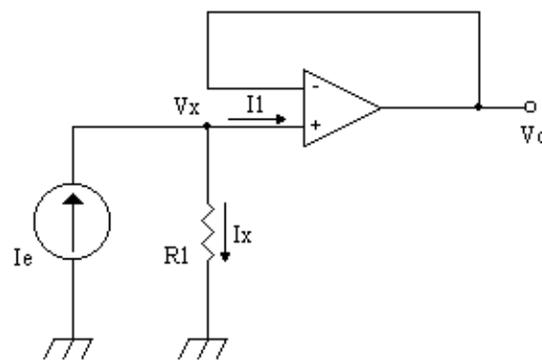


Figura 25. Circuito básico de un convertor de corriente a voltaje con salida no invertida.

Fuente: [34].

2.9 Protocolo RS-485

Es un protocolo estándar industrial, publicada en 1983 donde se definen las características eléctricas de un circuito para la comunicación digital de salida en modo “0” y “1” lógicos a través de una señal diferencial más una señal de alta impedancia que permite conectar más de un emisor en la red, lo que resulta muy conveniente a la hora de trabajos en redes industriales. [35].

2.9.1 Características mecánicas RS-485.

Uso de cable de par de cobre trenzado y terminales RJ11 que evita la interferencia electromagnética y se obtiene mayor velocidad de transmisión.

Conexión de hasta 32 emisores con 32 receptores en modo full dúplex, que hace posible enlazar procesadores “maestro” (principales) con procesadores “esclavos” (subordinados).

Compatibilidad con el estándar RS-232. [35]

2.9.2 Características eléctricas RS-485.

El emisor usa “1” lógico con tensión de -1.5 a -5V, el “0” lógico a la entrada del receptor con un rango de +0.2 a +12V y el voltaje máximo a la línea de salida es de -7 a +12V.

La transmisión posee un alcance dado por la relación entre el volumen de los datos de transferencia y el tiempo de señal en la portadora, lo que se obtiene 1200m como longitud máxima del cable y 10Mbps de velocidad máxima que se obtiene en 12m de distancia. [35]

2.9.3 Tipos de configuraciones de 485

Las configuraciones que se realizan mediante este protocolo RS-485 son constituidas por un transmisor y un receptor que son los que se comunican entre sí de diferentes maneras como se detalla a continuación. La *figura 30*, permite visualizar de manera ilustrativa las diferencias existentes entre los tipos de configuraciones.

2.9.3.1 Simplex

Esta configuración es una comunicación que permite la transferencia de información de forma unidireccional, desde el terminal que origina los datos hacia el que recibe y procesa, el receptor esta deshabilitado para responder al transmisor. Este método no se utiliza donde se requiere interacción humano-máquina; las aplicaciones más aptas son: radiodifusión de TV y radio, paging unidireccional. [36].

2.9.3.2 Half dúplex

Este método permite realizar la transferencia de datos en ambas direcciones, se debe agregar que la transmisión ocurre en una sola dirección a la vez, es decir debe culminar la transmisión que está realizando una terminal para después cambiar su estado a receptor. Un claro ejemplo es un operador que se encuentra en una comunicación mediante “woki toki”

puede transmitir (hablar) o recibir (escuchar), mas no realizar ambas funciones paralelamente por el mismo canal. [36].

2.9.3.3 Full dúplex

Esta configuración es la más completa ya que permite realizar la función de transmitir y de recibir por el mismo canal simultáneamente. Las aplicaciones que se realizan en el campo de telecomunicaciones mediante este método son bastantes, siendo el caso más representativo el teléfono, que utiliza el mismo canal como transmisor y receptor, pero con dos frecuencias diferentes. [36].

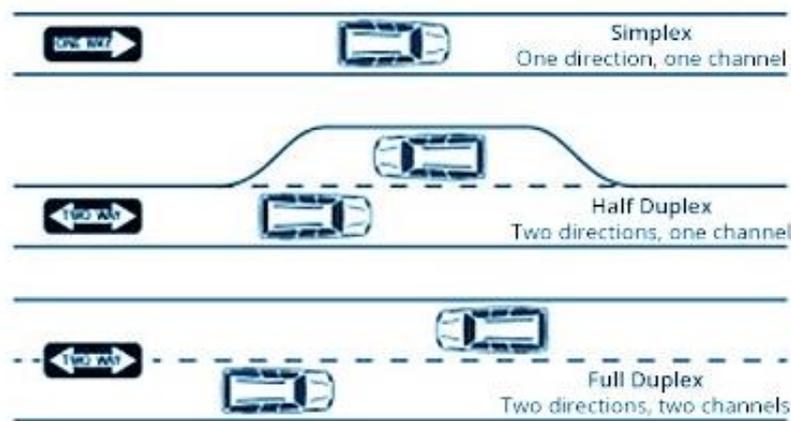


Figura 26: Ilustración de los sistemas de transmisión: simplex, semidúplex y dúplex.

Fuente: [37].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DEL SISTEMA MECÁNICO

3.1 Diseño y selección del mecanismo

3.1.1 Introducción

El siguiente capítulo describe de manera detallada el sistema y los subsistemas que compone el mecanismo para la automatización de la válvula, la etapa de selección y varios bocetos previos antes de llegar al diseño implementado. Cabe recalcar que se realizó con anterioridad un análisis y estudio conceptual que abordan todos los temas empleados en este proyecto.

3.1.2 Diseño y selección del sistema mecanismo.

Para el diseño del mecanismo se tomó en consideración contar con un sistema preciso ya que se lo implementara en el control del flujo de GLP que se conecta con quemadores para máquinas que usan como combustible gas licuado de petróleo, para ello es necesario que sea muy seguro, ya que una falla o fuga de gas puede provocar una ignición, la velocidad de respuesta debe ser más rápida que la información de datos proporcionada por la señal de sensor.

3.1.3 Diagrama funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.

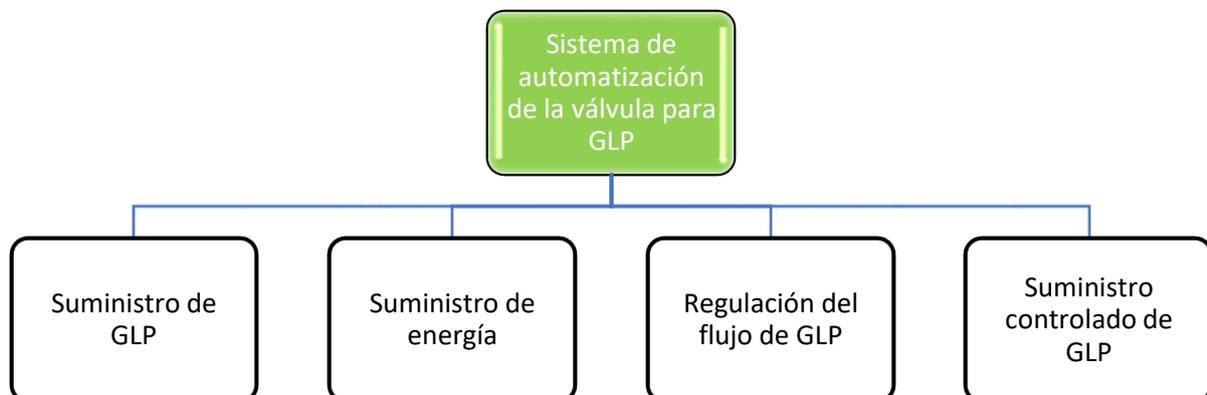


Figura 27. Diagrama funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.

3.1.4 Descomposición funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.

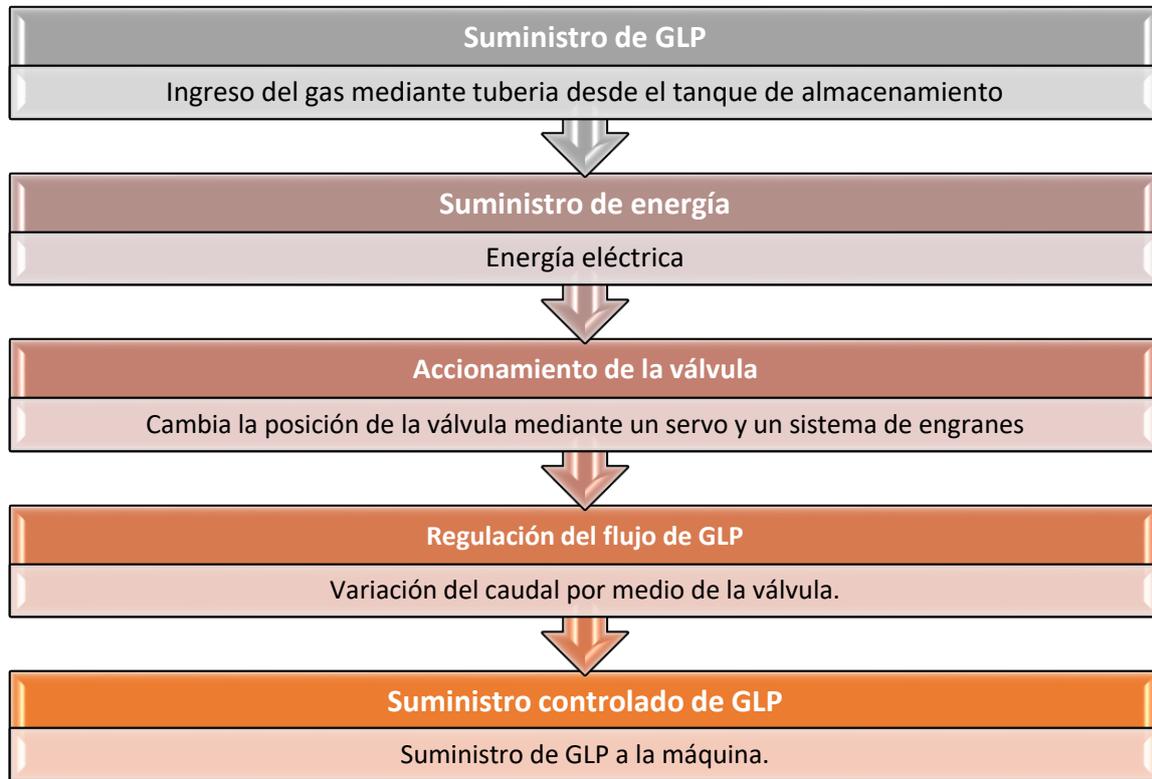


Figura 28: Descomposición funcional del sistema de automatización de la válvula para GLP.

3.1.4.1 Suministro de GLP.

Tabla 3.

Proceso de ingreso del gas licuado de petróleo.

Envases	Estacionario	Portátil
---------	--------------	----------

3.1.4.2 Suministrar energía

Tabla 4.

Procesos de suministro de energía.

Alimentación	Red Eléctrica	Baterías
Regulación de energía	Convertor AC – DC	Integrado

3.1.4.3 Accionamiento de la válvula.

Tabla 5.

Procesos de accionamiento.

Motor	Servomotor	Motor DC	Motor a pasos
Transmisión de potencia	Engranés	Polea	Directo

3.1.4.4 Regulación del flujo de GLP

Tabla 6.

Procesos de regulación.

Válvula	V. de globo	V. de aguja	V. de bola
---------	-------------	-------------	------------

3.1.5 Matriz morfológica

Tabla 7.

Matriz morfológica.

Envases	Estacionario		Portátil	
Alimentación	Red Eléctrica 110v		Baterías	
Regulación de energía	Convertor AC - DC		Integrado	
Motor	Motor a pasos	Servomotor	Motor DC	
Transmisión de potencia	Polea	Engrane	Directo	
Válvula	Globo	Ángulo	Diafragma	Aguja

3.2 Selección de Alternativas

La selección de los principales dispositivos mecánicos y eléctricos está realizada según el criterio de la ponderación, para verificar los mejores componentes que se adaptan al entorno y a los parámetros que desarrolla en este proyecto.

3.2.1 Selección del motor

Se ha tomado en cuenta tres soluciones que pueden ser implementados en la elaboración para este proyecto.

Solución A: Motor a pasos: NEMA 17

Solución B: Servomotor: MG996R

Solución C: Motor DC: Pololu Dc

A continuación, se indican los criterios cuantitativos que se ha designado para ponderar las alternativas sobre el motor que va a implementar.

- **Exactitud:** Indica la diferencia entre la salida real contra la salida teórica. Se escoge el motor que posea la mejor exactitud.
- **Torque:** Es la fuerza que ejecuta un motor sobre el eje de transmisión de potencia. Se elige el motor que cumpla con el par necesario para mover la válvula
- **Costo:** El valor económico del motor. Se requiere de un motor que sea económico.
- **Disponibilidad:** La comodidad para la adquisición del motor. Se prefiere un motor que resulte fácil de conseguir en el mercado local.
- **Tamaño:** Las dimensiones del motor. Se escoge el motor que sea pequeño para la implementación en una carcasa de espacio reducido.

3.2.1.1 Matriz de priorización de parámetros para el motor.

Seguidamente se muestra en la *tabla 8* una matriz de criterios que se establecieron anteriormente para la selección del motor, que permite obtener información sobre el valor de dichos criterios para definir la importancia de los mismos.

Tabla 8.

Matriz de priorización para la selección del motor.

CRITERIO	Exactitud	Torque	Costo	Disponibilidad	Tamaño	$\Sigma+1$	PONDERACION
Exactitud		0.5	1	0.5	1	4	23.53
Torque	0.5		1	0.5	1	4	23.53
Costo	0	0		0	0.5	1.5	8.82
Disponibilidad	0.5	0.5	1		1	4	23.53
Tamaño	0	0	0.5	0		1.5	8.82
					SUMA	17	100

Tabla 9.

Evaluación de las soluciones con respecto a la exactitud.

EXACTITUD	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0.5	1	2.5	41.67	1
Solución B	0.5		1	2.5	41.67	1

Solución C	0	0		1	16.67	2
			SUMA	6	100	

Tabla 10.

Evaluación de las soluciones con respecto al torque.

TORQUE	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0	0	1	16.67	3
Solución B	1		1	3	50	1
Solución C	1	0		2	33.33	2
			SUMA	6	100	

Tabla 11.

Evaluación de las posibles soluciones con respecto al costo.

COSTO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0	0	1	16.67	2
Solución B	1		0.5	2.5	41.67	1
Solución C	1	0.5		2.5	41.67	1
			SUMA	6	100	

Tabla 12.*Evaluación de las posibles soluciones con respecto a la disponibilidad.*

DISPONIBILIDAD	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0.5	1	2.5	41.67	1
Solución B	0.5		1	2.5	41.67	1
Solución C	0	0		1	16.67	2
			SUMA	6	100	

Tabla 13.*Evaluación de las posibles soluciones con respecto al tamaño.*

TAMAÑO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0.5	0	1.5	25	2
Solución B	0.5		0	1.5	25	2
Solución C	1	1		3	50	1
			SUMA	6	100	

Tabla 14.*Selección del motor.*

	Solución A	Solución B	Solución C
Exactitud	980.50	980.50	392.25
Torque	392.25	1176.50	784.25
Costo	147.03	367.53	367.53
Disponibilidad	980.50	980.50	392.25
Tamaño	220.50	220.50	441.00
SUMA	2720.78	3725.53	2377.28

Mediante las ponderaciones realizadas con las posibles alternativas indicadas en la *tabla 14*, para la implementación del motor, se ha llegado a la conclusión de que el motor más adecuado para la instalación que va a mover el mecanismo y por consiguiente la válvula es la solución B que es referente al servomotor.

3.2.2 Selección del mecanismo de transmisión de potencia.

Se ha tomado en cuenta dos soluciones que pueden ser implementados en la elaboración para este proyecto.

Solución A: Sistema de poleas

Solución B: Sistema de engranes

A continuación, se indican los criterios cuantitativos que se ha designado para ponderar las alternativas sobre el sistema que va a implementar en el proyecto.

- **Mantenimiento:** Se refiere a la disposición con la que cuenta el sistema para ser desmontado, rectificado, y ensamblado nuevamente.

- **Manufactura:** Se toma en cuenta parámetros como: el tiempo de fabricación, el diseño y la implementación del sistema.
- **Funcionalidad:** Que sea eficaz en el empleo de la transferencia de potencia que necesita el proyecto para que trabaje correctamente.
- **Costo:** Se hace referencia al valor económico de los materiales utilizados para la construcción del mecanismo.

3.2.2.1 Matriz de priorización de parámetros para la selección del mecanismo de transmisión de potencia.

Seguidamente se muestra en la *tabla 15* una matriz de criterios que se establecieron anteriormente para la selección del mecanismo, que permite obtener información sobre el valor de dichos criterios para definir la importancia de los mismos.

Tabla 15.

Matriz de priorización para el mecanismo de transmisión de potencia.

CRITERIO	Mantenimiento	Manufactura	Funcional	Costo	$\Sigma+1$	PONDERACION
Mantenimiento		1	0	0.5	2.5	25
Manufactura	0		0	0.5	1.5	15
Funcional	1	1		1	4	40
Costo	0.5	0.5	0		2	20
				SUMA	10	100

Tabla 16.

Evaluación de las soluciones de transmisión de potencia con respecto al mantenimiento.

MANTENIMIENTO	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0	1	33.33	2
Solución B	1		2	66.67	1
		SUMA	3	100	

Tabla 17.

Evaluación de las soluciones de transmisión de potencia con respecto a la manufactura.

MANUFACTURA	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		1	2	66.67	1
Solución B	0		1	33.33	2
		SUMA	3	100	

Tabla 18.

Evaluación de las posibles soluciones de transmisión de potencia con respecto a la funcionalidad.

FUNCIONALIDAD	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
---------------	------------	------------	------------	-------------	-----------

Solución A		0	1	33.33	2
Solución B	1		2	66.67	1
		SUMA	3	100	

Tabla 19.

Evaluación de las posibles soluciones de transmisión de potencia con respecto al costo.

COSTO	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0	1	33.33	2
Solución B	1		2	66.67	1
		SUMA	3	100	

Tabla 20.

Selección del mecanismo de transmisión de potencia.

	Solución A	Solución B
Mantenimiento	833.25	1666.75
Manufactura	1000.05	499.95
Funcional	1333.20	2666.80
Costo	666.60	1333.40
SUMA	3833.10	6166.90

Se ha tomado la solución B que indica la *tabla 20*, como resultado ganador para la implementación del mecanismo del sistema para la transmisión de potencia que une al servomotor con la válvula seleccionada posteriormente. La solución que logra cumplir con los parámetros requeridos es el sistema de engranes.

3.2.3 Selección de la válvula.

Se ha tomado en cuenta tres soluciones que pueden ser implementados en la elaboración de este proyecto.

Solución A: Válvula de globo

Solución B: Válvula de ángulo

Solución C: Válvula de diafragma

Solución D: Válvula de aguja

A continuación, se indican los criterios cuantitativos que se ha designado para ponderar las alternativas sobre el motor que va a implementar.

- **Estrangulación:** Indica la diferencia entre la salida real contra la salida teórica. Se escoge el motor que posea la mejor exactitud.
- **Disponibilidad:** La facilidad de adquirir el motor. Se elige el motor que resulte fácil de conseguir en el mercado local.
- **Costo:** El valor económico del motor. Se requiere de un motor que sea económico.

3.2.3.1 Matriz de priorización de parámetros para el motor.

Seguidamente se muestra en la *tabla 21* una matriz de criterios que se establecieron anteriormente para la selección del motor, que permite obtener información sobre el valor de dichos criterios para definir la importancia de los mismos.

Tabla 21.

Matriz de priorización para la selección de la válvula.

CRITERIO	Estrangulación	Disponibilidad	Costo	$\Sigma+1$	PONDERACION
Estrangulación		1	1	3	50
Disponibilidad	0		0.5	1.5	25
Costo	0	0.5		1.5	25
			SUMA	6	100

Tabla 22.

Evaluación de las soluciones con respecto a la estrangulación.

ESTRANGULACION	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		0.5	0	0	1.5	15	2
Solución B	0.5		0	0	1.5	15	2
Solución C	1	1		0.5	3.5	35	1
Solución D	1	1	0.5		3.5	35	1
				SUMA	10	100	

Tabla 23.*Evaluación de las soluciones con respecto a la disponibilidad.*

DISPONIBILIDAD	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		1	1	1	4	40	1
Solución B	0		1	0	2	20	3
Solución C	0	0		0	1	10	4
Solución D	0	1	1		3	30	2
				SUMA	10	100	

Tabla 24.*Evaluación de las soluciones con respecto al costo.*

COSTO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	PONDERACION	PRIORIDAD
Solución A		1	1	1	4	40	1
Solución B	0		0.5	0	1.5	15	3
Solución C	0	0.5		0	1.5	15	3
Solución D	0	1	1		3	30	2
				SUMA	10	100	

Tabla 25.*Selección de la válvula.*

	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D
Estrangulación	750	750	1750	1750
Disponibilidad	1000	500	250	750
Costo	1000	375	375	750
SUMA	2750	1625	2375	3250

Al finalizar las respectivas ponderaciones para la selección de la válvula, la solución ganadora que indica la *tabla 29*, de ponderación es la válvula de la solución D, siendo el resultado final, la utilización de una válvula de tipo aguja para implementarse en el trabajo.

3.2.4 Propuesta final.

Al finalizar las respectivas ponderaciones, se ha tomado los resultados para determinar la propuesta que se va a elaborar en el presente proyecto, siendo las mejores soluciones; la implementación del servomotor para impulsar el sistema de engranajes que a su vez permite realizar el movimiento y accionamiento de la válvula de aguja. Estos son los instrumentos que se escogieron para automatizar la válvula para regular el flujo de gas licuado de petróleo.

3.3 Diseño

3.3.1 Cálculos del sistema de mecánico

3.3.1.1 Cálculo del tren de engranajes

Para la elaboración de los engranajes se ha establecido una relación de 1:3.3 que se obtuvo mediante un tren de engranes lo que resulta apto para el parámetro de torque requerido por la válvula; partiendo de ello se indica el modulo y el número de dientes que deben poseer los conductores y los conducidos.

Datos:

Piñón 1 = 17 dientes

Corona 1 = 27 dientes

Piñón 2 = 13 dientes

Corona 2 = 27 dientes

Módulo = 1.5 mm

A continuación, se procede a obtener el diámetro primitivo que deben tener los engranajes tanto conductores (piñones) como conducidos (coronas) mediante la siguiente ecuación.

$$d = m * z \quad \text{Ec. 1. [38]}$$

Donde:

d_p = Diámetro primitivo de los engranajes.

m = Módulo de los engranajes.

z = Número de dientes de los engranajes.

Habiendo indicado dicha ecuación procedemos a realizar los cálculos para ambos engranajes, agregando los sufijos p_1 para el primer conductor, c_1 para el primer conducido, p_2 para el segundo conductor y c_2 para el segundo conducido.

- Diámetro primitivo:

$$d_{p_{p1}} = m * z_{p1}$$

$$d_{p_{p1}} = 1.5mm * 17$$

$$d_{p_{p1}} = 25.5mm$$

$$dp_{c1} = m * z_{c1}$$

$$dp_{c1} = 1.5mm * 27$$

$$dp_{c1} = 40.5mm$$

$$dp_{p2} = m * z_{p2}$$

$$dp_{p2} = 1.5mm * 13$$

$$dp_{p2} = 19.5mm$$

$$dp_{c2} = m * z_{c2}$$

$$dp_{c2} = 1.5mm * 27$$

$$dp_{c2} = 40.5mm$$

- Distancia entre centros de rotación:

$$a = \frac{dp2+dp3}{2} \quad \text{Ec. 2. [38]}$$

Donde:

a = Distancia entre los ejes de los engranes.

dp2 = Diámetro primitivo del piñón.

dp3 = Diámetro primitivo de la corona.

Distancia entre el conductor 1 y el conducido 1

$$a1 = \frac{dp_{p1} + dp_{c1}}{2}$$

$$a1 = \frac{25.5mm + 40.5mm}{2}$$

$$a1 = 33mm$$

Distancia entre el conductor 2 y el conducido 2

$$a2 = \frac{dp_{p2} + dp_{c2}}{2}$$

$$a2 = \frac{19.5mm + 40.5mm}{2}$$

$$a2 = 30mm$$

- Relación de transmisión

$$i = \frac{z2 * z4}{z1 * z3} \quad \text{Ec. 3. [38]}$$

$$i = \frac{27 * 27}{17 * 13}$$

$$i = 3.3$$

Para saber si la relación de transmisión que se obtuvo es correcta, se aconseja realizar una comprobación mediante los diámetros centrales como se detalla a continuación:

$$i = \frac{dp_{c1} * dp_{c2}}{dp_{p1} + dp_{p2}} \quad \text{Ec. 4. [38]}$$

$$i = \frac{40.5mm * 40.5mm}{25.5mm * 19.5mm}$$

$$i = 3.3$$

- Addendum o cabeza del diente (h_a)

$$h_a = 1 * m \quad \text{Ec. 5. [38]}$$

$$h_a = 1 * 1.5 \text{ mm}$$

$$h_a = 1.5 \text{ mm}$$

- Dedendum o pie del diente (h_f)

$$h_f = 1.25 * m \quad \text{Ec.6. [38]}$$

$$h_f = 1.25 * 1.5 \text{ mm}$$

$$h_f = 1.875 \text{ mm}$$

Las constantes que se indican en la Ec. 5 y Ec. 6 son recopiladas de la *Tabla 26* donde indica los valores que se emplean para establecer el tamaño de los dientes.

Tabla. 26.

Tamaño del addendum y dedendum para los dientes de un engrane

Tamaño de diente	Cabeza del diente (h_a)	Pie del diente (h_f)
Normales	1	1.25
Pequeños	0.75	1

Fuente: [38].

- Diámetro externo (d_e) de los engranajes conductores y conducidos de igual manera se utilizan los sufijos que anteriormente se mencionaron para distinguir cada engrane.

$$de_{p1} = dp_{p1} + 2 * ha \quad \text{Ec. 7. [38]}$$

$$de_{p1} = 25.5mm + 2 * 1.5mm$$

$$de_{p1} = 28.5 mm$$

$$de_{c1} = dp_{c1} + 2 * ha$$

$$de_{c1} = 40.5mm + 2 * 1.5mm$$

$$de_{c1} = 43.5 mm$$

$$de_{p2} = dp_{p2} + 2 * ha$$

$$de_{p2} = 19.5mm + 2 * 1.5mm$$

$$de_{p2} = 22.5 mm$$

$$de_{c2} = dp_{c2} + 2 * ha$$

$$de_{c2} = 40.5mm + 2 * 1.5mm$$

$$de_{c2} = 43.5 mm$$

- Diámetro interno (di) de los engranajes conductores y conducidos de igual manera se utilizan los sufijos que anteriormente se mencionaron para distinguir cada engranaje.

$$di_{p1} = dp_{p1} - 2 * hf \quad \text{Ec. 8. [38]}$$

$$di_{p1} = 25.5mm - 2 * 1.875mm$$

$$di_{p1} = 21.75 mm$$

$$di_{c1} = dp_{c1} - 2 * hf$$

$$di_{c1} = 40.5mm - 2 * 187.5mm$$

$$di_{c1} = 36.75 mm$$

$$di_{p2} = dp_{p2} - 2 * hf$$

$$di_{p2} = 19.5mm - 2 * 187.5mm$$

$$di_{p2} = 15.75 mm$$

$$di_{c2} = dp_{c2} - 2 * hf$$

$$di_{c2} = 40.5mm - 2 * 187.5mm$$

$$di_{c2} = 36.75 mm$$

- Espesor de los dientes (s)

$$s = \frac{13}{27} * \pi * m \quad \text{Ec. 9. [38]}$$

$$s = \frac{13}{27} * \pi * 1.5mm$$

$$s = 2.269 mm$$

- Ancho del hueco del diente (s')

$$s' = \frac{14}{27} * \pi * m \quad \text{Ec. 10. [38]}$$

$$s' = \frac{11}{27} * \pi * 1.5 \text{ mm}$$

$$s' = 2.443 \text{ mm}$$

- Paso circular (p)

$$p = s + s' \quad \text{Ec. 11. [38]}$$

$$p = 2.269 + 2.443 \text{ mm}$$

$$p = 4.712 \text{ mm}$$

De igual forma el paso se calcula mediante la multiplicación de π por el modulo escogido, de esta manera se justifica que los cálculos se encuentran correctamente.

$$p = \pi * m \quad \text{Ec. 12. [38]}$$

$$p = \pi * 1.5 \text{ mm}$$

$$p = 4.712 \text{ mm}$$

3.3.1.2 Cálculo del torque

Es preciso indicar que los datos que a continuación se muestran se recolectaron mediante experimentación a través de instrumentos que facilitaron la investigación del proyecto. En el *anexo 17* se puede ver el modo experimental de recopilación de valores.

Datos

$$m = 1.567 \text{ Kg}$$

$$d = 18 \text{ cm}$$

$$F = m * g \quad \text{Ec. 13. [39]}$$

Donde:

F = Magnitud de fuerza

m = masa

a = aceleración (gravedad)

$$F = 1.567Kg * \frac{9.81m}{s^2}$$

$$F = 15.367 N$$

Es decir, la fuerza que se utiliza para calcular el torque es de 15.367 N, una vez conocida esta fuerza multiplicamos por la distancia para obtener el torque.

$$T = F * d * \text{sen}\theta \quad \text{Ec. 14. [40]}$$

Donde:

T = Momento de torsión o torque.

d = Distancia al punto de giro.

θ = Ángulo de aplicación de la fuerza.

$$T = 15.367 N * 18cm * \text{sen}90^\circ$$

$$T = 28.206 \text{ kgf} * \text{cm}$$

Como resultado se obtuvo que el momento de torsión necesaria para girar el vástago de la válvula de aguja es 28.206 Kgf.cm. No obstante, el valor de la torsión obtenida se estableció en el punto más crítico; que es en el punto 0, o dicho de otra manera cuando se encuentra la válvula totalmente cerrada, ya que en otra posición el torque requerido es mucho menor al anteriormente mencionado; dicho argumento se establece de manera empírica, comprobada por el autor del proyecto.

Razón por la cual el servomotor MG996R seleccionado adicionalmente con el sistema de transmisión de potencia; cumplen los requerimientos obtenidos con un torque final de 31.02 Kgf.cm.

3.3.2 Cálculo del caudal.

Al obtener una válvula que no se obtuvo la información respectiva de la misma por parte del fabricante, se prosiguió a elaborar la curva de manera empírica, mediante el sensor “yfs201”, (ver más en anexos) que permite medir el caudal de un flujo. Mediante el puerto de serial de arduino se recopiló los datos que además se comprobó mediante experimentación con un tubo circular llenando agua durante un tiempo determinado para obtener el caudal respectivo, y de forma analítica como se muestra a continuación.

Datos

$$D = 73.2 \text{ mm}$$

$$A = 152.6 \text{ mm}$$

$$t = 0.175 \text{ min}$$

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \quad \text{Ec. 15.}$$

$$A = \pi * \frac{(73.2\text{mm})^2}{4}$$

$$A = 4208 \text{ mm}^2$$

Donde:

D = Diámetro del recipiente

A = Área del recipiente

t = Tiempo en recolectar el agua

$$V = A * h \quad \text{Ec. 16.}$$

$$V = 4208 \text{ mm}^2 * 152.6\text{mm}$$

$$V = 0.642 \text{ L}$$

Donde:

V = Volumen

h = Altura del agua

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ec. 17.}$$

$$Q = \frac{0.642L}{0.175min}$$

$$Q = 3.67 \frac{L}{min}$$

Donde:

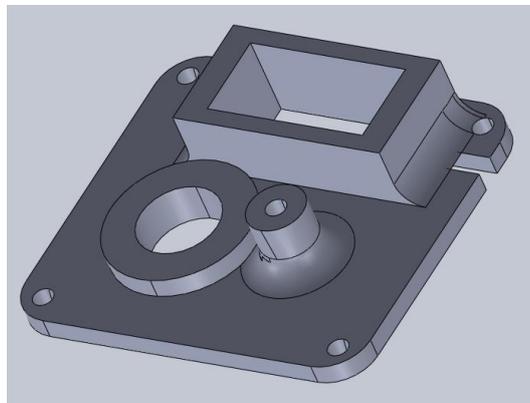
Q = Caudal de salida

El valor del caudal obtenido de manera experimental es de 3.67L/min que es aproximadamente equivalente al valor que se midió con el sensor que es de 3.534L/min. La posición de la válvula se abrió 1 mm para realizar la justificación anteriormente mencionada.

3.3.3 Piezas del sistema mecánico

3.3.3.1 Armazón

Se trata de la pieza principal, aquella que brinda el lugar y permite realizar la sujeción del resto de piezas para el respectivo ensamble.



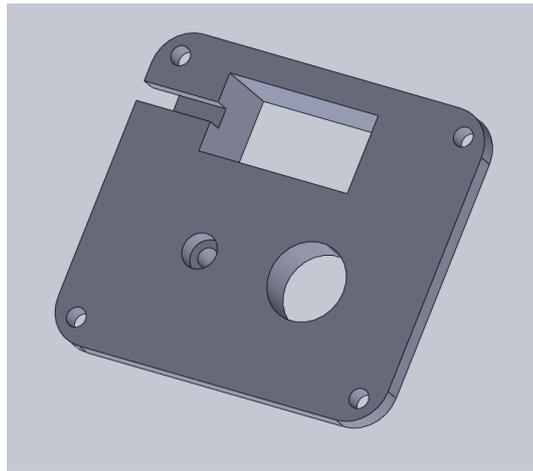


Figura 29. Armazón.

3.3.3.2 Base de la válvula

Esta pieza es la recubre a la válvula de aguja y permite el asentamiento de la misma evitando futuros posibles movimientos no deseados.

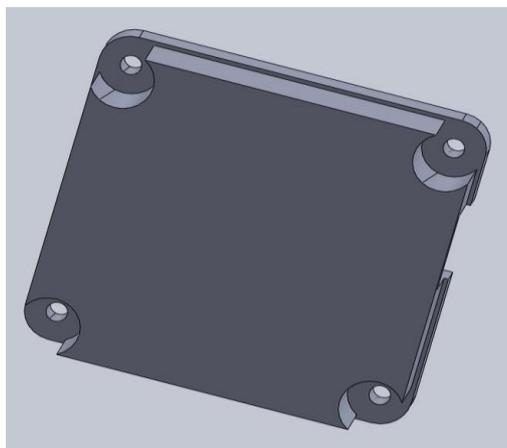
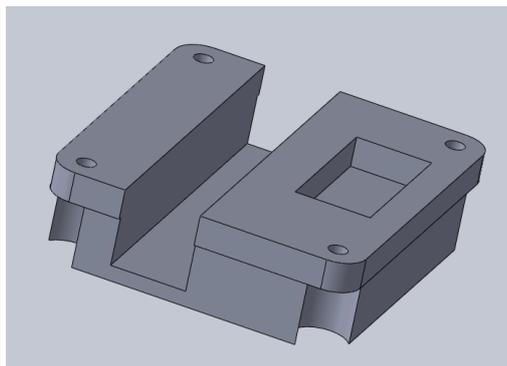


Figura 30. Base de la válvula.

3.3.3.3 Engrane menor.

Se indica a continuación el eje que se conecta en el servomotor es el engrane que se encarga de hacer la primera parte del sistema de transmisión de potencia, además en su interior posee un orificio con una cuña que sirve para acoplar el encoder.

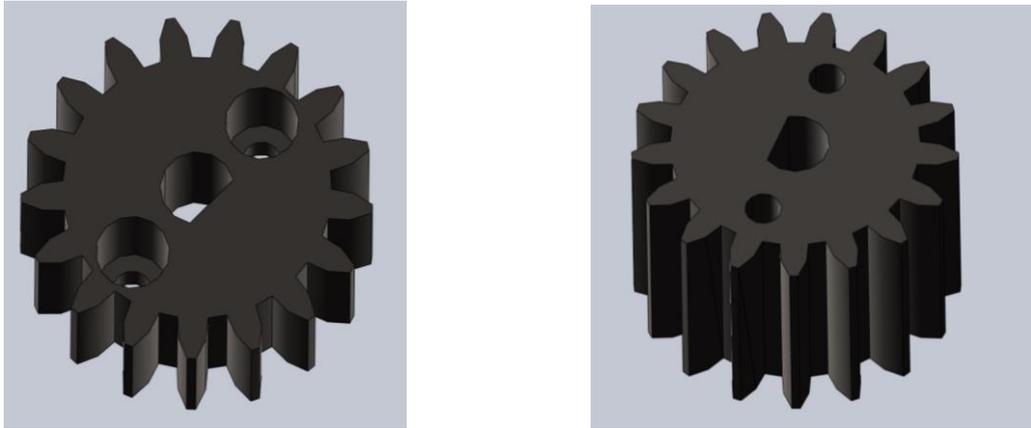


Figura 31. Engrane menor.

3.3.3.3 Engrane mixto.

Este engrane posee dos diámetros con diferente número de dientes, siendo el engrane mayor el conducido que viene del movimiento del engrane pequeño; y el engrane de menor dimensión es el conductor que va a enviar mayor torque al engrane que se conecta con la válvula.

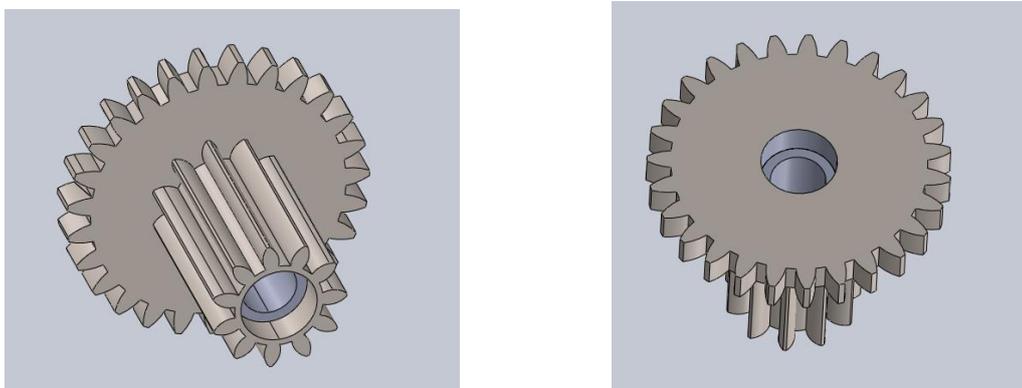


Figura 32. Engrane menor.

3.3.3.4 Engrane mayor

Este engrane es el que permite aumentar la fuerza ejercida por el motor en un 150%, si bien por un lado se logra un aumento, por otro se sacrifica la velocidad, ya que decrece la rapidez del giro en un 66.67%, por supuesto que no es un problema ya que los procesos térmicos no requieren de altas velocidades.

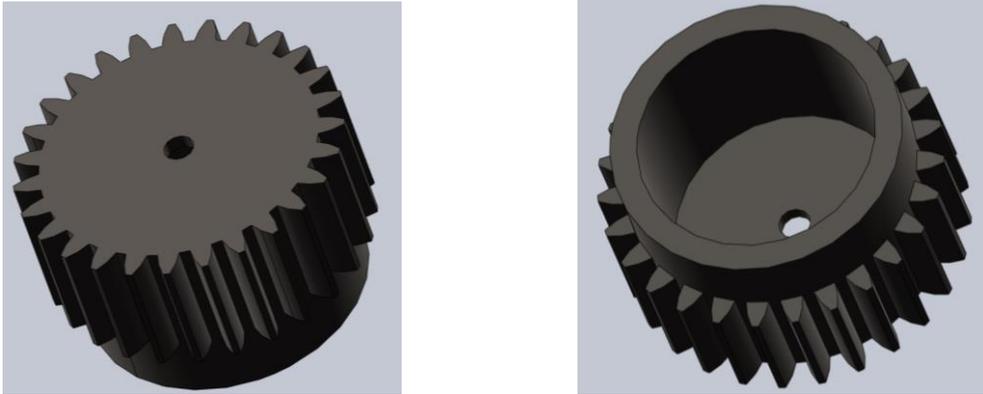


Figura 33. Engrane mayor.

3.3.3.7 Tapa intermedia

Es una tapa que cubre el sistema mecánico y a su vez cumple la función de base para el sistema eléctrico, de esta manera se logra obtener ordenado y separado ambos sistemas.

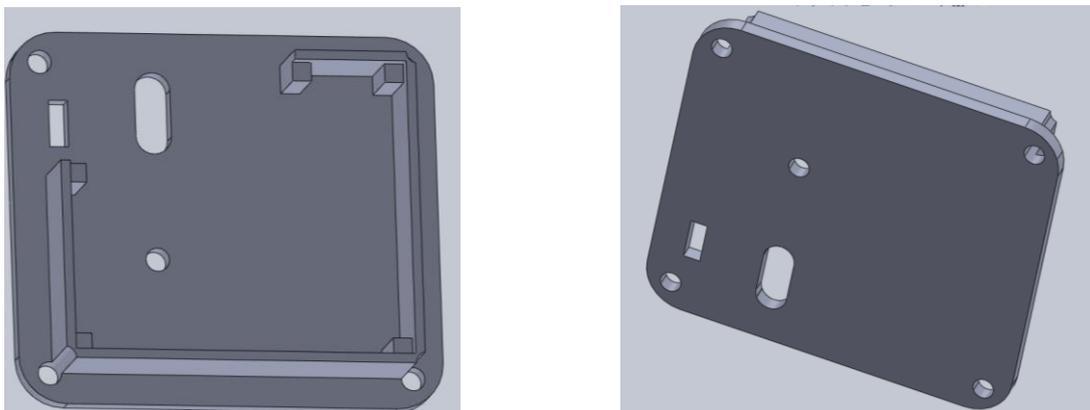


Figura 34. Tapa intermedia.

3.3.3.8 Tapa superior

Esta pieza es la cubierta superior en donde se encuentran dispositivos de mando e indicadores de funcionamiento como son: paro de emergencia, fuente de alimentación, comunicación de datos y leds de encendido y detenido.

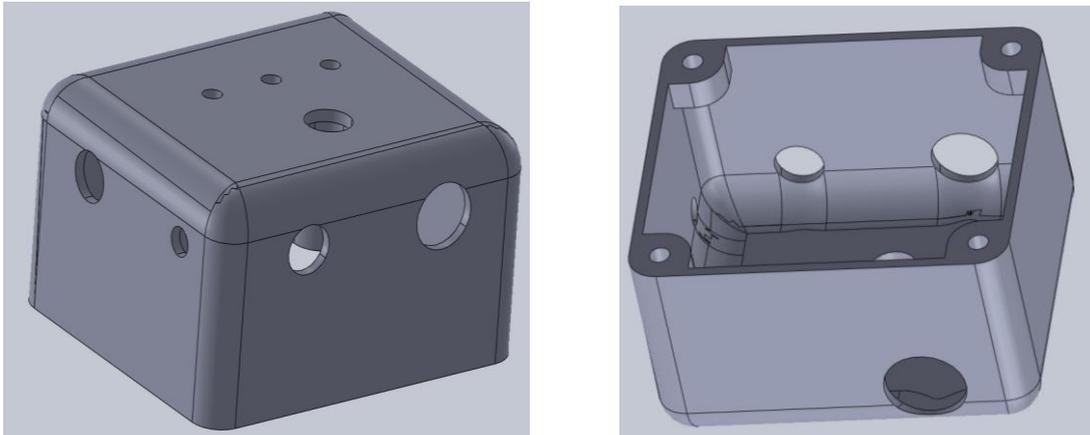


Figura 35. Tapa superior.

3.3.3.9 Válvula de aguja

Es una representación con medidas reales de la válvula de tipo aguja seleccionada para el presente trabajo, la misma que es la que se encarga de regular el flujo de GLP.

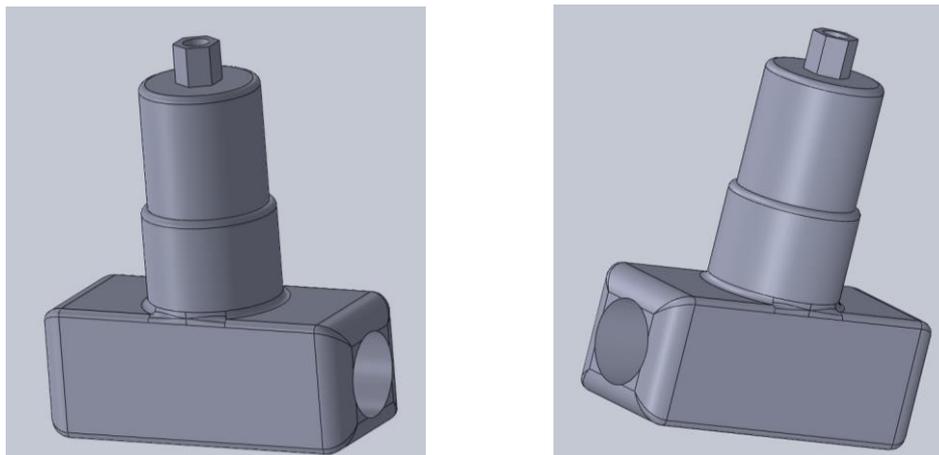


Figura 36. Válvula de aguja.

3.3.3.8 Servomotor

De igual manera es una representación a escala real del servomotor MG996R, realizada en software 3D para la simulación del ensamble total.

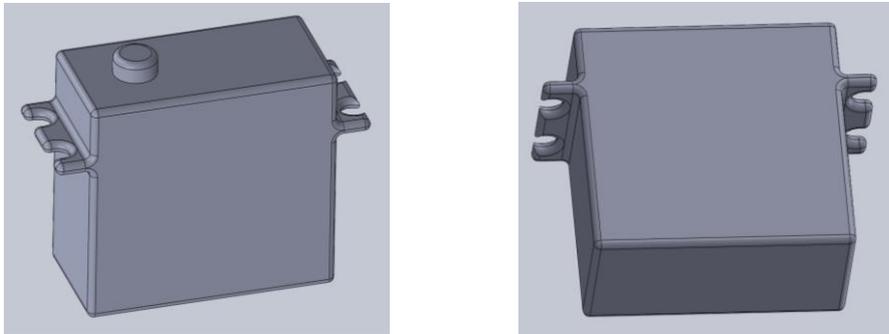


Figura 37. Servomotor.

3.3.3.9 Encoder

Es una pieza modelo de lo que en realidad es un encoder KY-040 que proporciona una indicación de cuantas pulsaciones ha rotado el botón al igual que la dirección en la que se está empleando el giro.

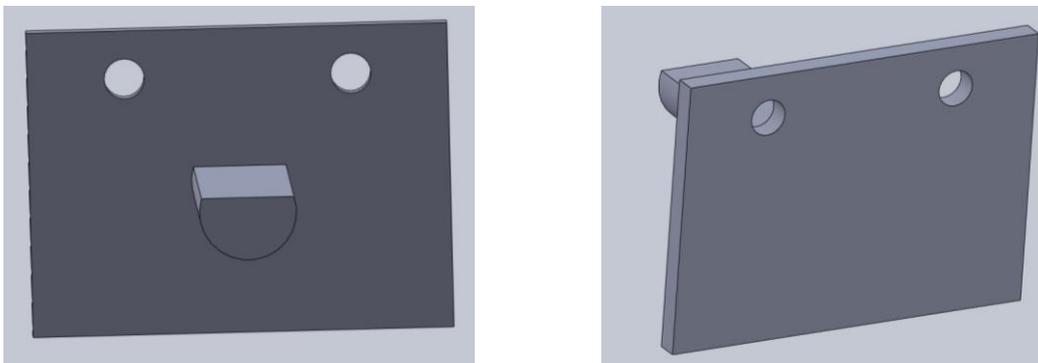


Figura 38. Encoder.

3.3.4 Diseño del sistema eléctrico.

3.3.4.1 Esquema del convertor de voltaje

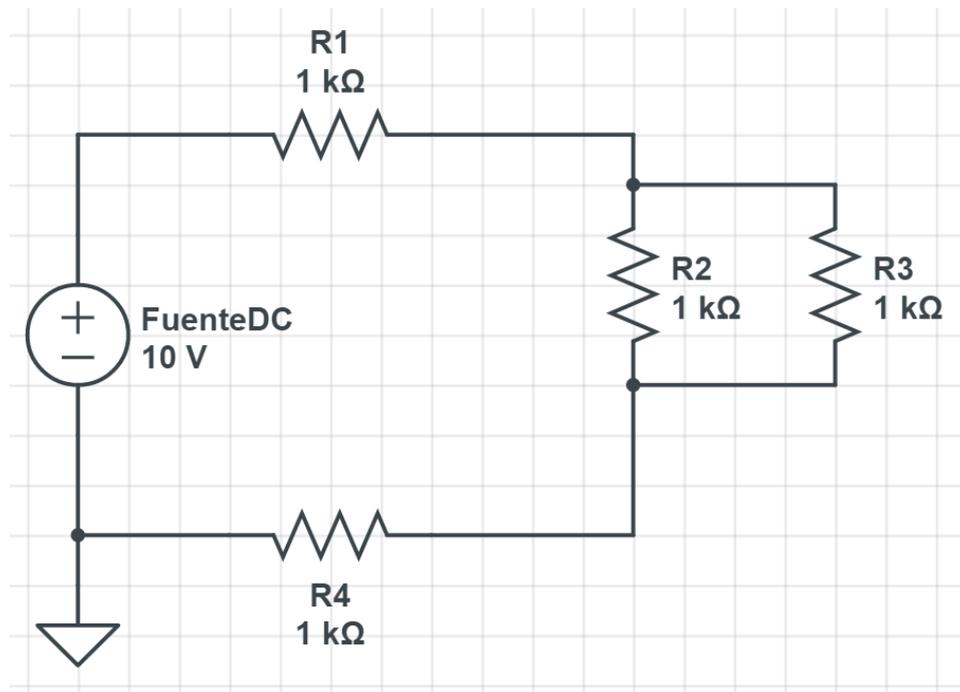


Figura 39. Esquema del convertor de voltaje.

3.3.4.2 Cálculo del convertor de voltaje.

El valor de voltaje que se muestran a continuación es un valore preestablecido en los parámetros de funcionamiento para el correcto trabajo de operación.

$$V_{in} = 10V$$

$$R1 = 1k\Omega$$

$$R1 = R2 = R3 = R4$$

Donde:

V_{in} = Voltaje de entrada externa.

$R1, R2, R3, R4$ = Resistencias del esquema.

Cálculo de la impedancia del circuito de la *figura 39*.

$$R_z = \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}{1} \quad \text{Ec. 18.}$$

$$R_z = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1000} + \frac{1}{1000}}$$

$$R_z = 500\Omega$$

$$R_t = R_1 + R_z + R_4$$

$$R_t = 2.5k\Omega$$

Donde:

R_z = Resistencia de la sumatoria en paralelo

R_t = Resistencia total

- Cálculo de la corriente de salida del conversor de voltaje

$$I_t = \frac{V_{in}}{R_t} \quad \text{Ec. 19.}$$

$$I_t = \frac{10V}{2.5k\Omega}$$

$$I_t = 4 \text{ mA}$$

Donde:

I_t = Corriente de salida del conversor de voltaje.

El resultado de la corriente que se obtuvo al desarrollar el arreglo de resistencias es de 4mA, este valor es el que ingresa al pin del arduino nano; se encuentra dentro del rango permisible, ya que cada puerto permite un ingreso de 20mA.

- Cálculo del voltaje de salida del conversor de voltaje.

$$V_{out} = \frac{V_{in} * R_4}{R_t} \quad \text{Ec. 20.}$$

$$V_{out} = \frac{10V * 1k\Omega}{2.5k\Omega}$$

$$V_{out} = 4V$$

Donde:

V_{out} = Voltaje de salida del convertor de voltaje.

El voltaje resultante que se obtiene a la salida del convertor, de igual manera que la corriente se encuentra en el rango permisible de los valores de trabajo del arduino nano, ya que los pines soportan hasta 5V y el valor obtenido es de 4V.

3.3.4.3 Simulación del esquema del convertor de voltaje.

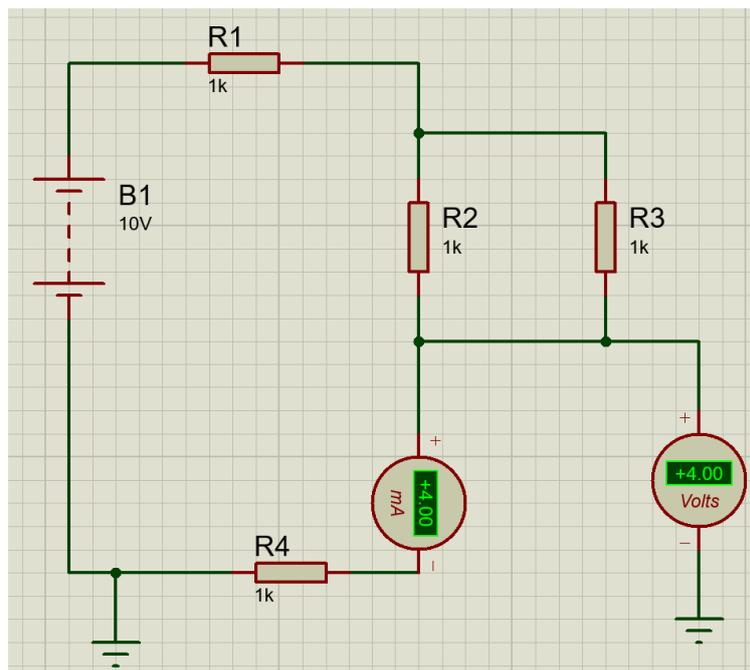


Figura 40. Simulación del convertor de voltaje.

3.3.3.4 Esquema del convertor de corriente.

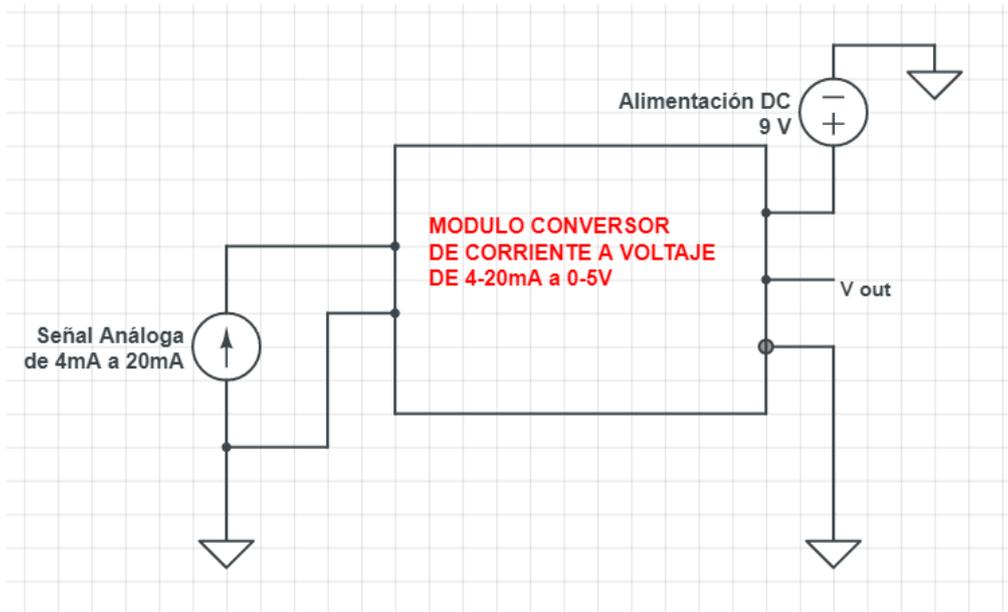


Figura 41. Esquema del convertor de corriente.

3.3.3.5 Cálculo del convertor de corriente.

El convertor de corriente a voltaje se determinó por medio de un módulo de que permite ingresar corriente desde 4mA hasta 20mA para transformar a diferentes salidas según se necesite, la configuración respectiva se realiza mediante un par de potenciómetros para poder calibrar el mínimo (0V) el máximo que varían entre los siguientes: 2.5V, 3.3V, 5V, 10V, 15V. De todos los valores máximos, el que se necesita y se ha seleccionado para ser calibrado es de 5V.

3.3.3.6 Esquema del protocolo RS-485.

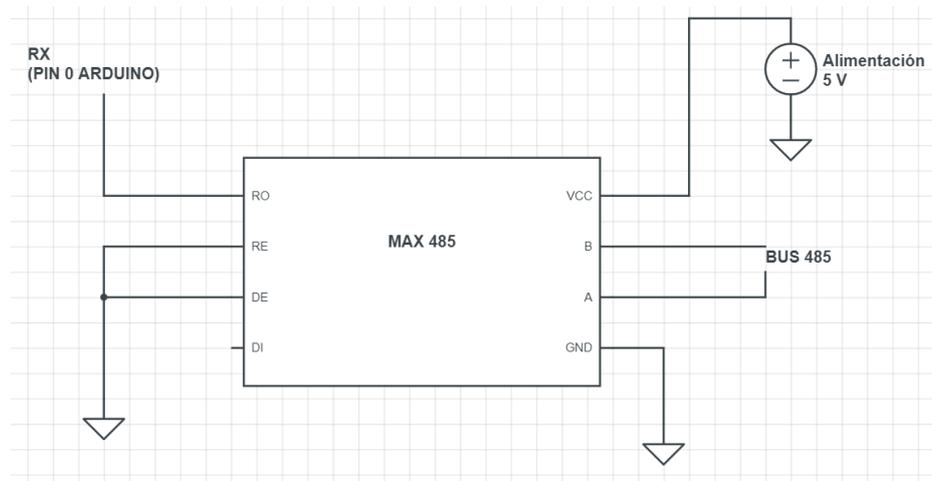


Figura 42. Esquema del MAX 485.

3.3.3.6 Cálculo del protocolo RS-485.

En el presente proyecto el protocolo RS-485 utiliza la configuración simplex, ya que trata de un actuador que está recibiendo una señal externa de un proceso industrial anterior, habiendo aclarado dicha situación se procede a mostrar el esquema del módulo en modo “receptor”.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Curva característica de la válvula

A continuación, se indica la curva característica obtenida:

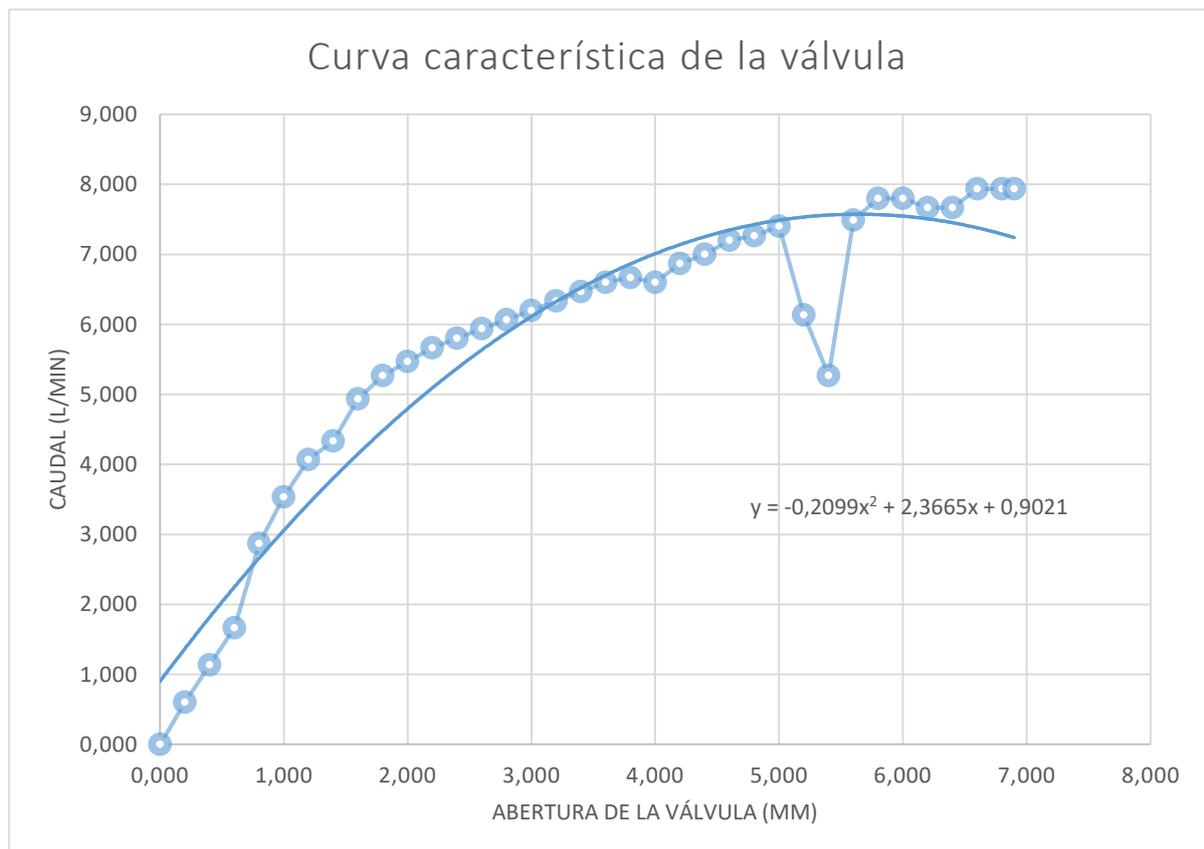


Figura 43: Curva característica de la válvula de aguja.

Dicha figura representa una ilustración de la cantidad de fluido que está circulando por el interior de la válvula, considerando que al estar muy abierta la válvula tiende a ser discontinua, el rango de trabajo que se establece para este proyecto es desde 0 hasta 5mm de apertura que se considera optimo y suficiente para operar de manera correcta a las necesidades preestablecidas.

4.2 Resultados de pasos y caudal por vueltas.

La *tabla 27*, detalla el valor del número de pasos que mide el encoder por cada vuelta que gira la válvula, además se detalla el caudal en litros por minuto en la salida del actuador.

Tabla 27.

Resultado en función de las vueltas de la válvula.

Vuelta de la válvula	Pasos encoder	Caudal (l/min)
1	118	3,534
2	236	5,467
3	352	6,200
4	469	6,600
5	587	7,400

4.3 Resultados de la comunicación análoga y digital.

A continuación, en la *tabla 28, 29, 30 y 31*, se puede observar el valor de referencia que se envía tanto en trabajo de operación automática como en la manual, y además de las vueltas que gira la válvula con su respectivo porcentaje de apertura para el paso del flujo de GLP.

Las pruebas son realizadas cinco veces en dos tipos de calderas, la primera de ellas es una cocineta antigua de cuatro quemadores y la segunda prueba en un horno para pan de tres flautines. Cada tabla detallada a continuación tiene un total de 10 pruebas para la verificación del funcionamiento adecuado.

Tabla 28.

Resultado de la comunicación de voltaje.

COMUNICACIÓN DE VOLTAJE	VUELTAS	PORCENTAJE DE APERTURA
0 V	0.0 VUELTAS	0 %

1 V	0.5 VUELTAS	10 %
2 V	1.0 VUELTAS	20 %
3 V	1.5 VUELTAS	30 %
4 V	2.0 VUELTAS	40 %
5 V	2.5 VUELTAS	50 %
6 V	3.0 VUELTAS	60 %
7 V	3.5 VUELTAS	70 %
8 V	4.0 VUELTAS	80 %
9 V	4.5 VUELTAS	90 %
10 V	5.0 VUELTAS	100%

Tabla 29.

Resultado de la comunicación de corriente.

COMUNICACIÓN DE CORRIENTE	VUELTAS	PORCENTAJE DE APERTURA
4 mA	0.0 VUELTAS	0 %
5 mA	0.313 VUELTAS	6.25 %
6 mA	0.625 VUELTAS	12.5 %
8 mA	1.25 VUELTAS	25 %
10 mA	1.875 VUELTAS	37.5 %
12 mA	2.5 VUELTAS	50 %

14 mA	3.125 VUELTAS	62.5 %
16 mA	3.75 VUELTAS	75 %
18 mA	4.375 VUELTAS	87.5 %
19 mA	4.688 VUELTAS	93.75 %
20 mA	5.0 VUELTAS	100 %

Tabla 30.

Resultado del modo de control manual.

POTENCIOMETRO de 100K Ω	VUELTAS	PORCENTAJE DE APERTURA
0 K Ω	0.0 VUELTAS	0 %
50 K Ω	2.5 VUELTAS	50 %
100 K Ω	5.0 VUELTAS	100 %
0 K Ω	0.0 VUELTAS	0 %
50 K Ω	2.5 VUELTAS	50 %
100 K Ω	5.0 VUELTAS	100 %
0 K Ω	0.0 VUELTAS	0 %
50 K Ω	2.5 VUELTAS	50 %
100 K Ω	5.0 VUELTAS	100 %

0 K Ω	0.0 VUELTAS	0 %
100 K Ω	5.0 VUELTAS	100 %

Tabla 31.*Resultado de la comunicación RS-485.*

COMUNICACIÓN RS-485	VUELTAS	PORCENTAJE DE APERTURA
0	0.0 VUELTAS	0 %
10	0.5 VUELTAS	10 %
20	1.0 VUELTAS	20 %
30	1.5 VUELTAS	30 %
40	2.0 VUELTAS	40 %
50	2.5 VUELTAS	50 %
60	3.0 VUELTAS	60 %
70	3.5 VUELTAS	70 %
80	4.0 VUELTAS	80 %
90	4.5 VUELTAS	90 %
100	5.0 VUELTAS	100%

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Las mejores válvulas que son para trabajos de estrangulación o regulación de gases son las de tipo aguja y de diafragma, sin embargo, por facilidad de adquisición, costos y tamaño la válvula de aguja presta una destreza que cumple con altos niveles de operación, misma que se escogió porque permite una excelente regulación del GLP.
- Los protocolos que son de tipo análogo tienden a ser más susceptibles a adquirir fallas por ruido que los protocolos de tipo digital. La vibración y el campo magnético que es generado por el empleo de motores en los protocolos análogos afecta con información o datos erróneos que ingresa en la transferencia de información. Se obtuvo un error de 2.5% en la comunicación digital y de 5% para la comunicación análoga.
- El diseño que permite realizar la automatización es un sistema de tren de engranajes compuesto, mismo que permite obtener un aumento en gran proporción de torque a 31.02 Kgf.cm, capaz de mover válvulas que necesitan de gran fuerza para el funcionamiento que la válvula requiere para cerrar completamente el paso de flujo.
- El diseño de comunicación es flexible ya que cuenta con diferentes maneras de transferencia de información, habiendo un sistema de voltaje de 0 a 10 V, sistema de corriente de 4 – 20 mA, RS-485. A ello se agrega un modo de uso manual, que permite controlar a gusto del operario.
- El diseño que se obtuvo fue compacto y permite la automatización de la válvula con una tarjeta de adquisición de datos con un total de 7.5% de error en 40 pruebas realizadas.

5.2 Recomendaciones

- Para la implementación de la válvula se requiere del uso una llave de paso colocada antes del dispositivo que permita hacer un cerrado rápido del flujo de gas.
- Engrasar los dientes de los engranes para evitar calentamiento y desgaste por el roce entre piezas, proporcionando mayor vida útil del sistema mecánico.
- Verificar la configuración del protocolo antes de enviar la información desde el PLC.

5.3 Trabajo Futuro

- Se puede implementar un dispositivo que permita setear el punto 0 que es la posición de cerrado de la válvula y una interfaz que indique el tipo de configuración que se está utilizando; un valor que permita conocer el porcentaje de apertura en tiempo real.
- El uso de un sensor de gas que detecte fugas no deseadas en el sistema; siendo el que ayuda a prevenir algún tipo de catástrofe en el trabajo.

ANEXOS

Anexo 1. Datos para la curva característica de la válvula de aguja.**Tabla 32.***Datos recolectados para obtener la curva característica.*

Posición (mm)	Dato 1 (Lt/min)	Dato 2 (Lt/min)	Promedio (Lt/min)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,200	0,533	0,667	0,600
0,400	1,200	1,067	1,134
0,600	1,600	1,733	1,667
0,800	2,933	2,800	2,867
1,000	3,600	3,467	3,534
1,200	4,000	4,133	4,067
1,400	4,400	4,267	4,334
1,600	4,933	4,933	4,933
1,800	5,333	5,200	5,267
2,000	5,467	5,467	5,467
2,200	5,600	5,733	5,667
2,400	5,867	5,733	5,800
2,600	6,000	5,876	5,938
2,800	6,000	6,133	6,067
3,000	6,133	6,267	6,200
3,200	6,267	6,400	6,334
3,400	6,533	6,400	6,467
3,600	6,533	6,667	6,600
3,800	6,667	6,667	6,667
4,000	6,667	6,533	6,600
4,200	6,800	6,933	6,867
4,400	7,067	6,933	7,000
4,600	7,200	7,200	7,200
4,800	7,200	7,333	7,267
5,000	7,333	7,467	7,400
5,200	6,133	6,133	6,133
5,400	5,333	5,200	5,267
5,600	7,647	7,333	7,490
5,800	7,867	7,733	7,800
6,000	7,733	7,867	7,800
6,200	7,600	7,733	7,667
6,400	7,733	7,600	7,667
6,600	8,000	7,867	7,934
6,800	8,000	7,867	7,934
6,900	7,867	8,000	7,934

Los datos de la *tabla 27*, son valores tomados experimentalmente para la obtención de la curva característica de la válvula de aguja.

Anexo 2. Especificaciones del sensor de flujo.

Tabla 33.

Especificaciones del sensor de flujo.

Parámetro	Valor
Mini. Voltaje de trabajo	DC 4.5V
Max. Corriente de trabajo	15mA (DC 5V)
Tensión de trabajo	5V ~ 24V
Rango de velocidad de flujo	1 ~ 30L / min
Capacidad de carga	≤ 10 mA (DC 5V)
Temperatura de funcionamiento	≤ 80 °C
Temperatura del liquido	≤ 120 °C
Humedad de funcionamiento	35% ~ 90% HR
Presión del agua	≤ 2.0 MPa
Temperatura de almacenamiento	-25 °C ~ + 80 °C
Humedad de almacenamiento	25% ~ 95% RH

Fuente: [41]

Anexo 3. Dimensiones mecánicas del sensor de flujo.

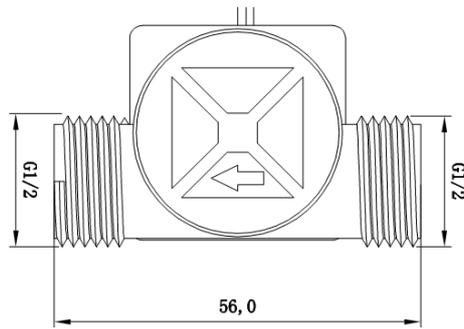


Figura 44. Vista superior del sensor de flujo.

Fuente: [41].

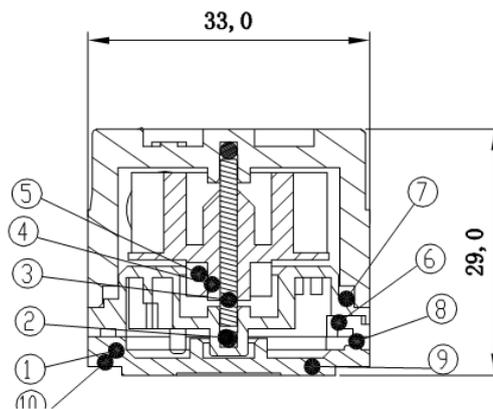


Figura 45. Sección transversal del sensor de flujo.

Fuente: [41].

Anexo 4. Componentes del sensor de flujo.

Tabla 34.

Componentes del sensor de flujo.

No.	Nombre	Cantidad	Material
1	Cuerpo de la válvula	1	PA66 + 33% fibra de vidrio
2	Cuenta de acero inoxidable	1	Acero inoxidable SUS304
3	Eje	1	Acero inoxidable SUS304
4	Impulso	1	POM

5	Imán de anillo	1	Ferrito
6	Anillo medio	1	PA66 + 33% fibra de vidrio
7	Junta tórica	1	Caucho
8	Anillo de cierre electrónico	1	Caucho
9	Cubrir	1	PA66 + 33% fibra de vidrio
10	Tornillo	4	Acero inoxidable SUS304
11	Cable	1	1007 24AWG

Fuente: [41]

Anexo 5. Curva característica del sensor de flujo

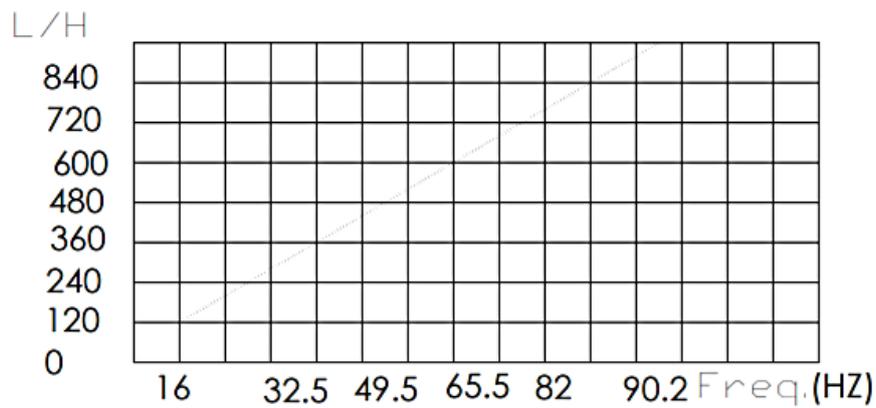


Figura 46. Curva característica del sensor de flujo.

Fuente: [42]

Anexo 6. Diagrama de conexión.

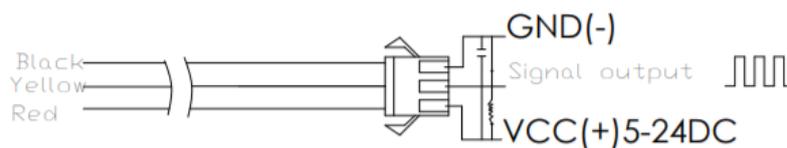


Figura 47. Diagrama de conexión.

Fuente: [42]

Anexo 7. Características del Max 485

Tabla 35.

Especificaciones técnicas del MAX 485.

Parámetro	Valor
Voltaje de operación	5v
Consumo corriente	500uA (max)
Chip principal	MAX485
Velocidad máxima	10Mbits/s (12m)
Longitud de alcance máximo	1200m (100kbits/s)

Fuente: [43]

Anexo 8. Esquema del Max 485

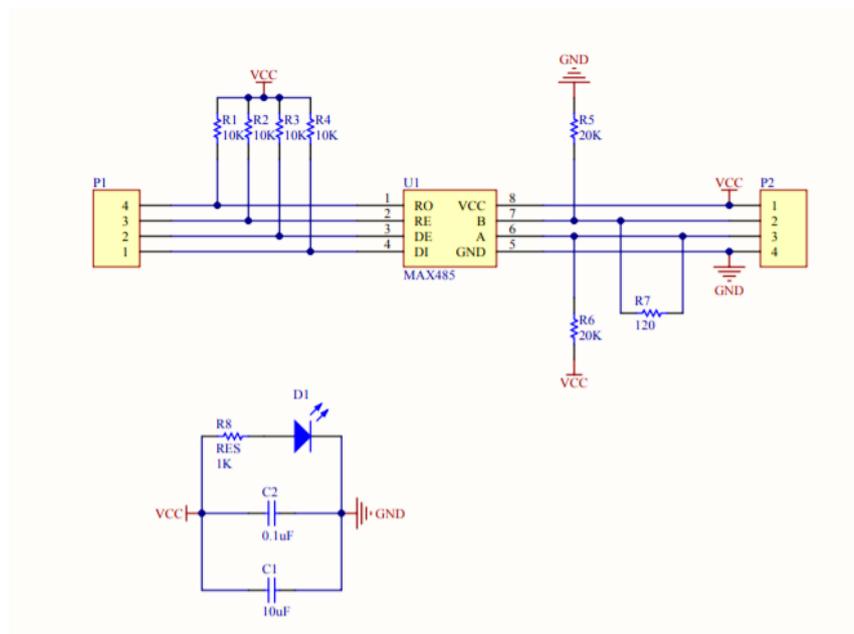


Figura 48. Esquema interno del MAX 485.

Fuente: [44]

Anexo 9. Configuración del motor a pasos unipolar (por olas).

En la tabla 30, se indica el orden de encendido que necesitan los para el funcionamiento con el torque y el paso nominal, a este tipo de control se llama control “por olas”, ya que se encienden dos transistores simultáneamente.

Tabla 36.

“Motor Unipolar. Orden de encendido de los transistores “por olas””.

Pasos	Q1	Q2	Q3	Q4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF

Fuente: [15].

Anexo 10. Configuración del motor a pasos unipolar (pasos medios).

En la *tabla 31*, se puede observar el orden de encendido de los transistores, para que trabaje a medios pasos, esta técnica de control es utilizada en aplicaciones donde se requiere una mayor exactitud del movimiento del eje.

Tabla 37.

“Motor Unipolar. Orden de encendido de los transistores medios pasos”.

Pasos	Q1	Q2	Q3	Q4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF
3	ON	OFF	OFF	ON
4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	OFF	OFF
7	OFF	ON	ON	OFF

8	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Fuente: [15].

Anexo 11. Configuración del motor a pasos bipolar (pasos completos).

La *tabla 32*, contiene la información sobre el orden de encendido de los transistores, para obtener el paso y el torque nominal del motor, cabe recalcar que, si se desea emplear el cambio de giro, únicamente es necesario cambiar el orden de los pasos a 4-3-2-1.

Tabla 38.

“Motor Bipolar. Orden de encendido de los transistores pasos normales”.

Pasos	Q1-Q4	Q2-Q3	Q5-Q8	Q6-Q7
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Fuente: [15].

Anexo 12. Configuración del motor a pasos bipolar (pasos medios).

Si se requiere usar medios pasos es necesario utilizar la configuración de la *tabla 33*, esto genera una mayor precisión del motor, aunque es necesario sacrificar la velocidad si se toma de referencia el mismo torque de los pasos. El paso nominal de estos motores es de 2° y si se emplea esta distribución el paso es de 1°.

Tabla 39.

“Motor Bipolar. Orden de encendido de los transistores medios pasos”.

Pasos	Q1-Q4	Q2-Q3	Q5-Q8	Q6-Q7
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF
3	ON	OFF	OFF	ON
4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	OFF	OFF
7	OFF	ON	ON	OFF
8	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Fuente: [15].

Anexo 13. Marcas de Servomotores

Según el departamento de Electrónica de la UTFSM (Universidad Técnica Federico Santa María) en la *Tabla 34*, nos permite apreciar las variedades de algunos fabricantes, y características sobre los servomotores que podemos encontrar en el mercado.

Tabla 40.

Características Técnicas de algunas marcas de servo.

Fabricante	Duración del puso			Frecuencia	Color de los cables		
	Mínima	Neutral	Máxima		Positivo	Negativo	Control
Futaba	0,9	1,5	2,1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0,9	1,5	2,1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner/Jr	0,8	1,5	2,2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1,05	1,6	2,15	40	Rojo	Negro	Amarillo

Robbe	0,65	1,3	1,95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1,2	1,7	2,2	50	Rojo	Azul	Negro

Fuente: [18].

Anexo 14. Esquema electrónico.

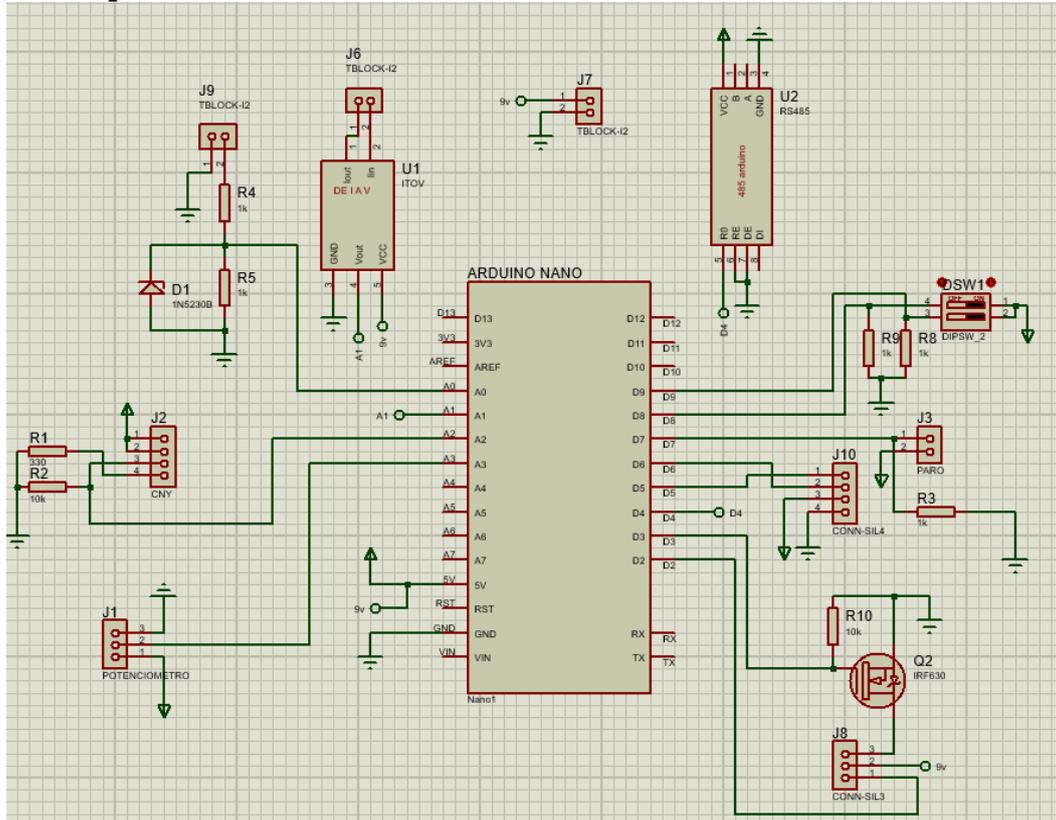


Figura 49. Esquema electrónico.

Anexo 15. Ilustración de la placa de control

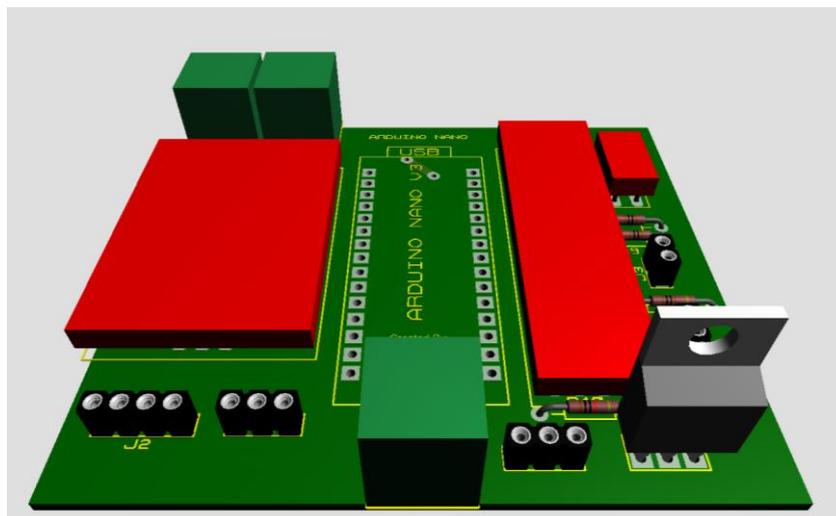


Figura 50. Ilustración de la placa de control.

Anexo 16. PCB de la placa

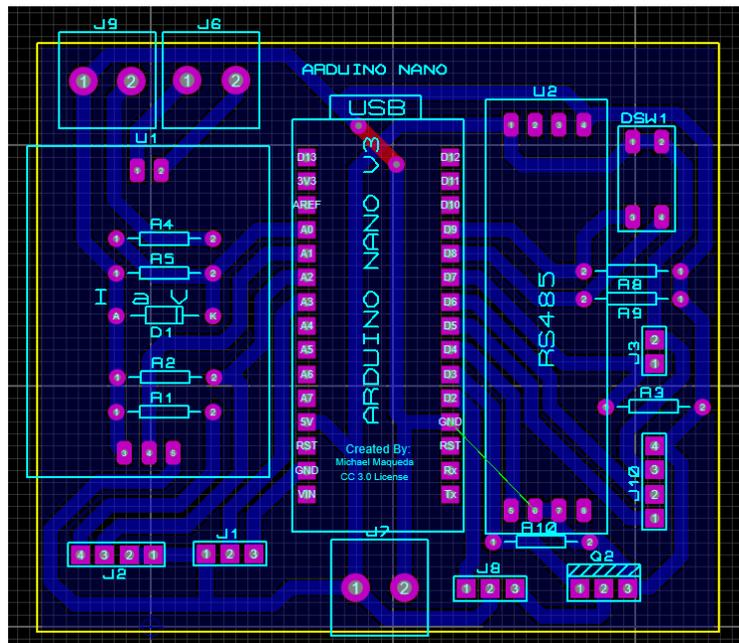


Figura 51. Ilustración del PCB de la placa de control.

Anexo 17. Masa requerida para los cálculos del torque.



Figura 52. Valor de la masa requerida para el torque..

Anexo 18. Pruebas de calibración de la comunicación de corriente.

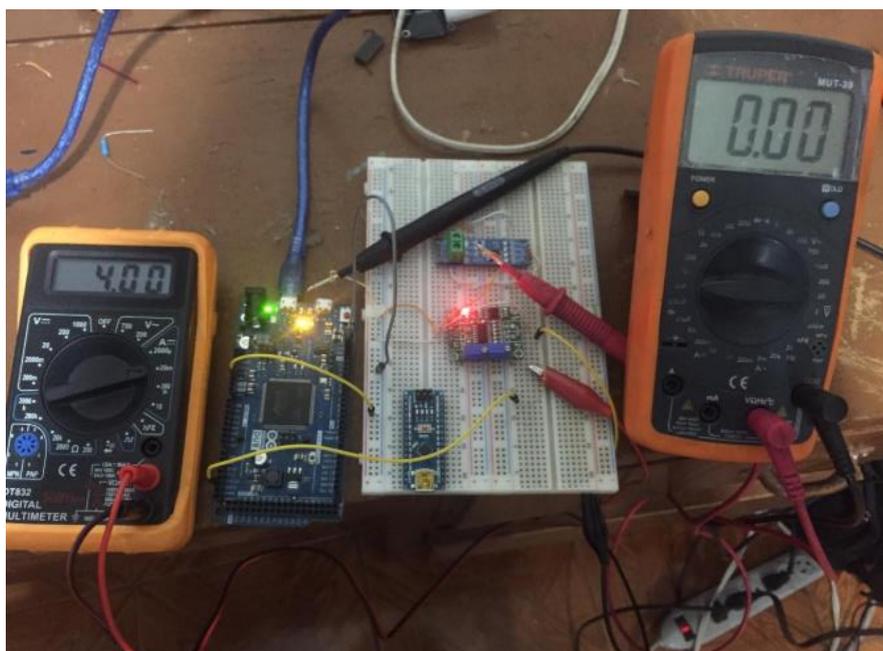


Figura 53. Calibración con dos multímetros.