



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ACOPLAMIENTO DE UN SISTEMA NEUMÁTICO CON REGENERACIÓN A UNA BICICLETA DE CIUDAD”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ANDRÉS VLADIMIR CHÁVEZ GUEVARA
andres.chavez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR M.Sc.
angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, agosto de 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **ANDRÉS VLADIMIR CHÁVEZ GUEVARA**, bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Portilla M. Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Andrés Vladimir Chávez Guevara**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito 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 correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Andrés Vladimir Chávez Guevara

DEDICATORIA

A mis padres Víctor y Martha, por brindarme todos los recursos necesarios para crecer como persona, tanto en el ámbito espiritual como profesional. Sin su cariño y esfuerzo nada sería igual en mi vida.

A mi esposa Johana, por su paciencia, apoyo y, sobre todo, por compartir su tiempo y animarme durante la ejecución del proyecto. Seguiremos juntos con nuevos proyectos.

A mi abuelita Rebeca, por su apoyo en cada momento y permitirme compartir, en vida, la felicidad de culminar un proyecto.

A la memoria de mis abuelitos que abandonaron este mundo físico, por darme la oportunidad de existir. Así como todo regresa a la fuente, seguro existirá un tiempo y un espacio para compartir nuevamente.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi familia, a mis hermanos Víctor, Fausto, Fritz, Sabrina y Frank, porque cada uno me ha enseñado algo importante de la vida. Gracias por formar parte de ella. Les llevo en mi corazón.

A la familia de mi esposa, especialmente a Carlos, Patricia y Mercedes, por su predisposición a brindar su ayuda en cualquier momento.

A mi director de tesis, Ing. Ángel Portilla, por facilitarme el tiempo para la ejecución de la tesis, guiándome con su experiencia y objetividad.

ÍNDICE

Certificación	i
Declaración	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	xviii
Abstract.....	xix
Introducción.....	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis	2
1. FUNDAMENTOS.....	3
1.1. Características de la bicicleta urbana y su usuario.....	3
1.1.1 Bicicleta Urbana.....	3
1.1.2. Usuario.....	4
1.2. Energía y regeneración	5
1.2.1. Primera ley de la termodinámica o ley fundamental	5
1.2.2. Balance de Energía	6
1.2.3. Regeneración	6
1.2.4. Aportación	8
1.3. Sistema de Transmisión.....	8
1.3.1. Relación de transmisión	9
1.3.2. Torque.....	11
1.3.3. Potencia	15
1.3.4. Catarinas	15
1.3.5. Cadenas.....	15
1.4. Sistema Neumático.....	16
1.4.1. Compresor	17
1.4.2. Reservorio.....	19
1.4.3. Presostato	20
1.4.4. Unidad de tratamiento.....	21
1.4.5. Líneas de transporte del fluido	21
1.4.6. Válvulas.....	22
1.4.7. Motor Neumático	27

1.5.	Sistema de Control	28
1.5.1.	Sensor	28
1.5.2.	Actuadores.....	28
1.5.3.	Controlador automático.....	29
1.5.4.	Plataformas basadas en Microcontroladores.....	29
1.6.	Resistencia de Materiales	31
1.6.1.	Esfuerzo	31
1.6.2.	Esfuerzo normal.....	31
1.6.3.	Esfuerzo cortante	31
1.6.4.	Resistencia	32
1.6.5.	Factor de seguridad	33
2.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA NEUMÁTICO CON REGENERACIÓN	34
2.1.	Diseño conceptual del sistema neumático con regeneración	34
2.1.1.	Requerimientos para el diseño	35
2.1.2.	Diferencias de altura	35
2.1.3.	Variación de la rapidez	36
2.1.4.	Límites de la rapidez.....	38
2.1.5.	Distancia y tiempo de regeneración/aportación	39
2.2.	Diseño básico del sistema neumático con regeneración	39
2.2.1.	Regeneración	40
2.2.2.	Aportación	40
2.2.3.	Consolidación de los procesos de regeneración y aportación.....	41
2.2.4.	Análisis energético para el proceso de regeneración	42
2.2.5.	Análisis energético para el proceso de aportación	48
2.3.	Diseño de detalle del sistema neumático.....	52
2.3.1.	Características de la bicicleta.....	52
2.3.2.	Diseño del sistema neumático	53
2.3.3.	Proceso de regeneración.....	53
2.3.4.	Proceso de aporte	54
2.3.5.	Criterio para el dimensionamiento del sistema neumático regenerativo	55
2.3.6.	Sistema Neumático	56
2.3.7.	Selección de los elementos del Sistema Neumático	60
	A) Unidad de filtración	61
	B) Motor Neumático.....	62
	C) Electroválvula	65

D) Válvula reguladora de presión.....	66
E) Válvula de alivio	67
F) Reservorio	68
G) Válvulas anti retorno y accesorios.....	69
H) Mangueras	70
2.4. Diseño de detalle del sistema de transmisión.....	70
2.4.1. Proceso de Regeneración	71
2.4.2. Proceso de Aportación	71
2.4.3. Acoplamiento	72
2.4.4. Relación de transmisión	76
2.4.5. Selección de los elementos del sistema de transmisión	78
2.4.6. Cadena	79
2.4.7. Catarinas	79
2.5. Ensamblaje virtual del sistema de transmisión y neumático.....	86
2.6. Fabricación de los elementos del sistema de transmisión.....	90
2.7. Ensamblaje físico del sistema de transmisión y neumático.....	91
2.7.1. Sistema de Transmisión	91
2.7.2. Sistema Neumático	94
2.8. Diseño y construcción del sistema de control	96
2.9. Diseño conceptual	96
2.9.1. Requerimientos para el funcionamiento en la regeneración	96
2.9.2. Requerimientos para el funcionamiento en la aportación	97
2.9.3. Otros requerimientos para el funcionamiento del sistema.....	98
2.9.4. Consolidación de los requerimientos	99
2.10. Diseño básico	100
2.10.1 Parámetros de operación.....	100
2.10.2. Diagrama de flujo	101
2.10.3. Requerimientos mínimos del sistema de control	102
2.11. Diseño de detalle.....	102
2.11.1. Selección de los elementos	103
2.11.2. Integración de los elementos al sistema de control	110
2.12. Programación.....	113
2.12.1. Arduino IDE.....	113
2.12.2. Código del programa	113
2.13. Construcción y Montaje	114
2.13.1. Integración de los elementos en la caja de control.....	114

2.13.2. Pantalla LCD 16x2	115
3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	116
3.1. Protocolo de Pruebas.	116
3.1.1. Prueba de vacío	116
3.1.2. Prueba con carga	118
3.1.2.1. <i>Definición del trayecto.....</i>	118
3.1.2.2. <i>Datos del trayecto</i>	119
3.1.2.3. <i>Datos del conjunto usuario - bicicleta</i>	119
3.1.2.4. <i>Variables a medir</i>	120
3.1.2.5. <i>Recopilación de datos.....</i>	120
3.2. Resultados y Análisis de Resultados	121
3.2.1. Prueba 1	121
3.2.2. Prueba 2	123
3.2.3. Prueba 3	124
3.2.4. Análisis de resultados.....	126
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	130
4.1. Conclusiones.	130
4.2. Recomendaciones.....	130
Referencias Bibliográficas.	132
Anexo I	135
Anexo II	150
Anexo III	154
Anexo IV	156
Anexo V	163
Anexo VI	167
Anexo VII.....	174
Anexo VIII.....	189
Anexo IX	194
Anexo X	226

ÍNDICE DE FIGURAS

1. FUNDAMENTOS

Figura 1.1. Partes de una bicicleta de ciudad.....	3
Figura 1.2. Sistemas integrados en la bicicleta urbana.....	4
Figura 1.3. Transformación de la energía potencial en energía cinética.....	5
Figura 1.4. Identificación de los tramos de descenso del ciclista.....	7
Figura 1.5. Sistema de transmisión de una bicicleta.....	9
Figura 1.6. Relación de velocidades para el sistema de transmisión neumático.....	10
Figura 1.7. DCL bicicleta y usuario en descenso.....	11
Figura 1.8. DCL bicicleta y usuario en ascenso.....	14
Figura 1.9. Partes de una catarina.....	15
Figura 1.10. Identificación de las dimensiones de una cadena de doble torón.....	16
Figura 1.11. Elementos principales de un sistema neumático.....	17
Figura 1.12. Tipos de compresores Capacidad vs Presión.....	18
Figura 1.13. Compresor de paletas	18
Figura 1.14. Operación del tanque de almacenamiento	20
Figura 1.15. Posiciones del presostato para interrupción eléctrica	20
Figura 1.16. Modelos de unidades de tratamiento	21
Figura 1.17. Líneas para transporte de fluido	22
Figura 1.18. Válvula de tres vías y dos posiciones. (3/2).....	23
Figura 1.19. Simbología de la válvula 3/2: a) normalmente abierta, b) normalmente cerrada.....	23
Figura 1.20. Simbología de la válvula 4/2 actuada por doble piloto, biestable.....	23
Figura 1.21. Simbología de la válvula 5/2 actuada por doble piloto, biestable	23
Figura 1.22. Válvula de aguja de regulación de caudal bidireccional con orificio variable.....	24
Figura 1.23. Válvula de regulación de caudal unidireccional con orificio variable.....	24
Figura 1.24. Funcionamiento de la válvula reguladora sin orificio.....	25
Figura 1.25. Funcionamiento de la válvula reguladora con orificio de venteo	26
Figura 1.26. Funcionamiento de la válvula reguladora operada por piloto	26
Figura 1.27. Funcionamiento de un motor de paletas	27
Figura 1.28. Partes de un motor de paletas	28
Figura 1.29. Componentes de un sistema de control automático	29

Figura 1.30. Placas Arduino Uno/Genuino Uno	30
Figura 1.31. Esfuerzo normal y cortante.....	32

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y NEUMÁTICO.

Figura 2.1. Procesos del sistema neumático regenerativo.....	34
Figura 2.2. Curvas de nivel de la ciudad de Quito	36
Figura 2.3. Reporte del recorrido (Salida)	37
Figura 2.4. Reporte del recorrido (Regreso).....	38
Figura 2.5. Diagrama básico del proceso de regeneración.	40
Figura 2.6. Diagrama básico del proceso de aportación.	41
Figura 2.7. Procesos consolidados en los sistemas de transmisión y neumáticos.....	42
Figura 2.8. Gráfica velocidad vs tiempo para el proceso de regeneración.	43
Figura 2.9. Gráfica Altura vs Distancia para el proceso de regeneración.	43
Figura 2.10. Gráfica Potencia vs ángulo de inclinación para el proceso de regeneración.	46
Figura 2.11. Gráfica Potencia vs ángulo de inclinación, 3 casos sector 1-2.	47
Figura 2.12. Gráfica Potencia vs ángulo de inclinación, 3 casos sector 2-3.....	47
Figura 2.13. Gráfica velocidad vs tiempo para el proceso de aportación.	48
Figura 2.14. Gráfica Altura vs Distancia para el proceso de aportación.	49
Figura 2.15. Gráfica Potencia vs ángulo de inclinación para el proceso de aportación.	51
Figura 2.16. Diagrama del sistema neumático para la regeneración.....	54
Figura 2.17. Diagrama del sistema neumático para la aportación.	55
Figura 2.18. Potencia vs ángulo de inclinación en la aportación.	58
Figura 2.19. Elementos empleados en los procesos de regeneración y aportación.	60
Figura 2.20. Unidad de filtración y lubricación.....	62
Figura 2.21. Curvas de desempeño del motor neumático seleccionado.	64
Figura 2.22. Fotografía del motor neumático LZB33AR004 11.	64
Figura 2.23. Fotografía de la electroválvula 4V220-08.	65
Figura 2.24. Fotografía de la válvula reguladora de presión.	66
Figura 2.25. Fotografía válvula de alivio.....	67
Figura 2.26. Fotografía de la válvula check o antirretorno.	69
Figura 2.27. Fotografía de algunos accesorios de línea.....	69
Figura 2.28. Recomendaciones de diámetros de mangueras.....	70
Figura 2.29. Manguera empleada en el proyecto.	70
Figura 2.30. Ubicación del acople para la transmisión.	72

Figura 2.31. Bosquejo inicial del acople.....	73
Figura 2.32. Acoplamiento mediante pernos prisioneros.	74
Figura 2.33. Clasificación de cadenas de acuerdo a la ANSI	79
Figura 2.34. Intervalo de la velocidad angular en ascenso a 12 km/h.....	80
Figura 2.35. Factores de corrección para diferentes presiones.	81
Figura 2.36. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 12 km/h.	81
Figura 2.37. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 10 km/h.	83
Figura 2.38. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 8 km/h.....	84
Figura 2.39. Bicicleta modelada en 3D.....	86
Figura 2.40. Componentes neumáticos modelados en 3D.	87
Figura 2.41. Componentes 3D del sistema de transmisión.	88
Figura 2.42. Soporte 3D para sujeción de los elementos.....	88
Figura 2.43. Ensamblaje 3D de los elementos al soporte, a) sin reservorio y b) con reservorio.	89
Figura 2.44. Ensamblaje virtual completo.	89
Figura 2.45. Fabricación del soporte	90
Figura 2.46. Acoplamiento rueda posterior	90
Figura 2.47. Acoplamiento Motor.	91
Figura 2.48. Ensamblaje del soporte.	91
Figura 2.49. Ensamblaje del acople de la rueda posterior.	92
Figura 2.50. Tensor.	92
Figura 2.51. Instalación de la cadena.	93
Figura 2.52. Descarrilador transmisión.	94
Figura 2.53. Electroválvula montada en el soporte.	94
Figura 2.54. Conexiones al motor neumático.	95
Figura 2.55. Conexiones entrada de aire.	95
Figura 2.56. Manifold, reservorio y facilidad para carga de aire externo.....	96
Figura 2.57. Esquema conceptual para la regeneración.	97
Figura 2.58. Esquema conceptual para la aportación.....	98
Figura 2.59. Entradas y salidas del sistema de control.	99
Figura 2.60. Diagrama de flujo básico.	101
Figura 2.61 Fotografía del acelerómetro MMA7361.	104

Figura 2.62. Fotografía del sensor de presión.	105
Figura 2.63. Interruptores de freno.	105
Figura 2.64. Sensor magnético.	106
Figura 2.65. Caja de la bobina de la electroválvula.	107
Figura 2.66. Pantalla LCD 16x2.	107
Figura 2.67. Arduino Uno.	108
Figura 2.68. Batería.	110
Figura 2.69. Módulo de dos relay.	111
Figura 2.70. Diagrama de conexionado.	112
Figura 2.71. Ubicación del sistema de control.....	114
Figura 2.72. Caja de control y sus elementos.	115
Figura 2.73. Caja de la pantalla LCD.	115

3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Figura 3.1. Trayecto para la prueba con carga.....	118
Figura 3.2. Altimetría del trayecto	119
Figura 3.3. Gráfica Presión y Rapidez vs Tiempo para la prueba 1.....	122
Figura 3.4. Gráfica Presión y Rapidez vs Tiempo para la prueba 2.....	124
Figura 3.5. Gráfica Presión y Rapidez vs Tiempo para la prueba 3.....	126
Figura 3.6. Gráfica Presión vs Tiempo para las tres pruebas.....	126
Figura 3.7. Gráfica Rapidez vs Tiempo para las tres pruebas.....	127
Figura 3.8. Altimetría del trayecto.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y NEUMÁTICO.

Tabla 2.1. Variables definidas para la regeneración	44
Tabla 2.2. Potencia de regeneración al variar el ángulo de inclinación	44
Tabla 2.3. Variables definidas para la aportación	49
Tabla 2.4. Variables definidas para la regeneración.....	50
Tabla 2.5. Características de la bicicleta.....	52
Tabla 2.6. Variables definidas para el cálculo del torque	56
Tabla 2.7. Cálculo del torque requerido por el motor	57
Tabla 2.8. Características de la unidad de filtración	61
Tabla 2.9. Características del motor de paletas a seleccionar	62
Tabla 2.10. Características del motor neumático de paletas seleccionado	63
Tabla 2.11. Características de la electroválvula seleccionada	65
Tabla 2.12. Características de la válvula reguladora de presión seleccionada	66
Tabla 2.13. Características de la válvula de alivio seleccionada	67
Tabla 2.14. Tabla de valoraciones para selección del material	68
Tabla 2.15. Torque máximo para cada proceso	73
Tabla 2.16. Cálculo de la cantidad de pernos de acuerdo a la rosca métrica	75
Tabla 2.17. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático	76
Tabla 2.18. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 12 km/h	77
Tabla 2.19. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 10 km/h.....	78
Tabla 2.20. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 8 km/h	78
Tabla 2.21. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 12 km/h	82
Tabla 2.22. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 10 km/h	84
Tabla 2.23. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 8 km/h	85
Tabla 2.24. Resumen para la selección del conjunto de catarinas	85
Tabla 2.25. Condiciones y escenarios de operación	100

Tabla 2.26. Pines requeridos para cada elemento y el voltaje de la señal	102
Tabla 2.27. Especificaciones del acelerómetro	103
Tabla 2.28. Especificaciones del sensor de presión.	104
Tabla 2.29. Especificaciones generales de la electroválvula	106
Tabla 2.30. Especificaciones generales de la pantalla LCD 16x2	107
Tabla 2.31. Comparación entre dos placas.....	108
Tabla 2.32. Voltajes y corrientes de operación a alimentar con la fuente	109
Tabla 2.33. Especificaciones generales de la batería	109
Tabla 2.34. Especificaciones generales del módulo de 2 relay	111

3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 3.1. Lista de verificación de la prueba de vacío.....	117
Tabla 3.2. Pesos del conjunto usuario - bicicleta.....	119
Tabla 3.3. Variables a medir en la prueba con carga	120
Tabla 3.4. Datos prueba 1.....	121
Tabla 3.5. Datos prueba 2.....	123
Tabla 3.6. Datos prueba 3.....	124
Tabla 3.7. Información procesada a partir de la figura 3.8.....	128

RESUMEN

El crecimiento poblacional de la ciudad de Quito en los últimos años conlleva actualmente a un problema de movilidad de las personas que lo habitan. El presente trabajo apunta al uso de la bicicleta como medio de movilidad e incorpora un sistema neumático que mediante otros subsistemas regeneran la energía excedente durante un descenso y posteriormente hace útil esta energía al momento de ascender, reduciendo el esfuerzo del usuario. El sistema neumático cuenta con un subsistema de control que le permite al usuario gestionar la energía disponible en el reservorio. Las pruebas se evaluaron mediante los procesos de regeneración y aportación, quedando implícitamente la evaluación del sistema de control. A lo largo de las pruebas se observó que el proceso de regeneración neumática es posible. Además, se determinó que el sistema neumático, al contar con un reservorio, puede ser fácilmente recargado mediante una fuente externa (gasolinera, vulcanizadora, etc.). Por esta razón, a lo largo de las pruebas se realizó la aportación tanto con la energía almacenada de la regeneración y por otra parte con la energía obtenida mediante una fuente externa. Los datos recopilados durante las pruebas indicaron que, al aplicar la aportación con 63 psi de carga en el reservorio, durante un ascenso de 3.5°, se vio incrementada la rapidez hasta 12 km/h aproximadamente. Se concluye que el sistema neumático puede ampliar el uso de la bicicleta en usuarios que por algún motivo no deban realizar mayor esfuerzo.

Palabras Clave:

Bicicleta, Energía, Neumática, Potencia, Regeneración.

ABSTRACT

The population growth of Quito city in the latest years carries to a mobility problem of the people who live in it at present. This job aims to the use of the bicycle as a mobility way and incorporate a pneumatic system that together with other subsystems regenerate the excessive energy involved in a descent and subsequently it makes the energy useful in an ascend, reducing the user effort. The pneumatic system has a control subsystem, which manages the available energy saved in the reservoir. Bicycle tests were evaluated according to the processes of regeneration and drive, being implicit the evaluation of the control system. The regeneration process is possible in agreement with the tests. Because of the fact that the pneumatic system has a reservoir, it was established that it can be charged by means of an external source (fuel station, vulcanizer, etc.). For this reason, the drive process was performed with the energy stored by regeneration and with the energy provided by means of external source. All data saved along the test shown that charging the reservoir up to 63 psi, during an ascent of 3.5°, results in an increase of speed of 12 km/h approximately. In conclusion, the pneumatic system can extend the bicycle use to users that, for any reason, shouldn't do much effort.

Keywords:

Bicycle, Energy, Pneumatic, Power, Regeneration.

“ACOPLAMIENTO DE UN SISTEMA NEUMÁTICO CON REGENERACIÓN A UNA BICICETA DE CIUDAD”

INTRODUCCIÓN

El sistema de movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito presenta serias deficiencias, siendo de mayor influencia el del tráfico vehicular. Esto provoca que la calidad de vida de los usuarios se vea afectada por el tiempo empleado en trasladarse de un lugar a otro y por la contaminación que se genera.

Por otro lado, el sistema de transporte público dista mucho de brindar un servicio de calidad y cobertura a los ciudadanos por lo que no representa una competencia frente al vehículo particular. [1]

Existe un Plan Maestro de Movilidad (PMM) para el D.M. de Quito 2009 – 2025 que incorpora tres partes: la primera indica el estado actual (para aquél año) de la movilidad de personas y bienes dentro del distrito, la segunda indica las propuestas para disminuir y revertir los aspectos deficitarios y la tercera contiene la estrategia para llevar a cabo las propuestas del PMM. [2] En el plan se puede identificar el interés por proyectos de transporte motorizado masivo tales como mejoras en el sistema Metrobus, implementación de un tren urbano en 3 fases y proyectos de transporte no motorizado como la movilidad peatonal y la bicicleta. También contempla la gestión del tráfico, la infraestructura de la movilidad, gestión del sistema de movilidad y los costos que demandan la concreción del plan.

En el año 2014 apenas un 15.6% representa el transporte no motorizado y el resto corresponde al transporte motorizado, siendo un 61.3% para el transporte público y un 23.0% para el transporte privado. Apenas un 0.3% corresponde al transporte en bicicleta.

En la actualidad existe un proyecto municipal llamado BiciQuito que tiene una red de ciclovías para permitir la movilidad a lo largo y ancho de la ciudad. Cuenta con 25 estaciones y 658 bicicletas estándar. [3] Las ciclovías más empleadas son aquellas ubicadas a lo largo de la ciudad y las de menor uso son las transversales, debido a que la geografía de la ciudad presenta pendientes importantes en dicho sentido y esto limita el uso de las bicicletas a cierto grupo de personas. Para solucionar este inconveniente se han introducido 300 bicicletas eléctricas, que aportan 200W de potencia y requieren aproximadamente 4 a 5 horas de carga para dar una autonomía de 35 km, además de las instalaciones en cada estación para poder cargarlas. [4] [5] [6]

Se propone adicionar en la bicicleta de ciudad, un sistema neumático regenerativo con el fin de brindar una ayuda al usuario y que éste pueda superar confortablemente los ascensos característicos de la ciudad. Dicho sistema incluye la posibilidad de regeneración

que consiste en aprovechar la energía involucrada en un trayecto de descenso y almacenarla para que posteriormente sea utilizada en otros escenarios.

Pregunta de Investigación

¿Es el sistema de regeneración neumática un mecanismo aplicable a la bicicleta urbana?

Objetivo general

Acoplar un sistema neumático con regeneración a una bicicleta de ciudad.

Objetivos específicos

- Incorporar un sistema neumático regenerativo en una bicicleta.
- Disponer de una fuente de aire comprimido para distintos propósitos.
- Elaborar un sistema de control que maneje la carga y descarga del reservorio de manera óptima.
- Determinar la autonomía y la capacidad de carga del sistema regenerativo.

Hipótesis

El presente trabajo pretende brindar una alternativa de movilidad no motorizada que sea práctica, económica y amigable con el medio ambiente.

1. FUNDAMENTOS

Es importante tener en cuenta que el punto de partida para ejecutar el acoplamiento del sistema neumático regenerativo, es el funcionamiento exclusivamente mecánico de la bicicleta. Esto quiere decir que, para la transformación de la energía remanente durante un descenso en bicicleta, se emplean dispositivos como el conjunto de catarinas y actuadores neumáticos, evitando otras transformaciones de la energía que restarían la eficiencia global y agregarían peso al conjunto usuario-bicicleta.

1.1. Características de la bicicleta urbana y su usuario

1.1.1 Bicicleta Urbana

Las especificaciones de una bicicleta urbana pueden variar dependiendo de la región y del usuario. La figura 1.1. indica las partes de una bicicleta urbana.

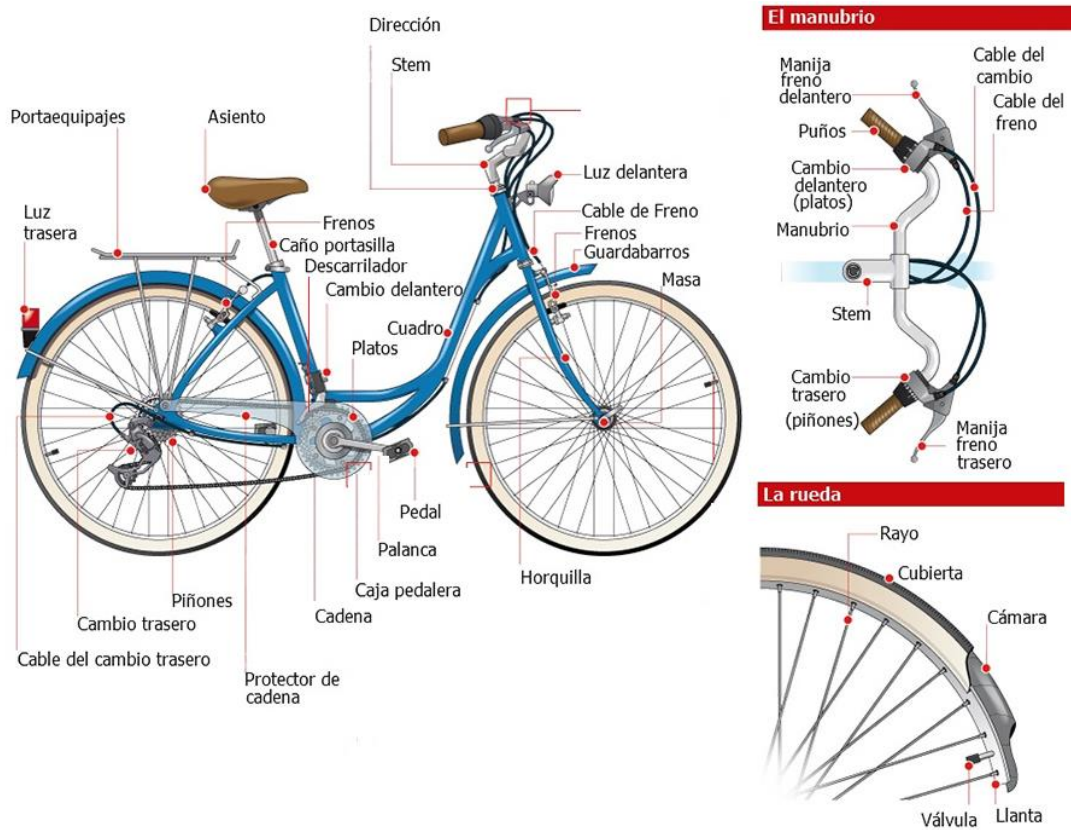


Figura 1.1. Partes de una bicicleta de ciudad. [7]

“No todas las bicicletas son iguales a la del dibujo. Algunas, por ejemplo, tienen frenos de disco o cambios de más velocidades. La forma del cuadro y la posición del manubrio o del asiento también pueden diferir considerablemente. De cualquier forma, la infografía

representa una bicicleta con los elementos más usuales, comunes a la mayoría de bicicletas.” [7]

Como datos de interés se tiene que una bicicleta con cuadro de aluminio puede tener una masa aproximada de 18 [kg]. Aquellas comparables con la biciQuito tienen 7 marchas, llantas semilisas reforzadas de 26 [in], guardafangos y elementos reflectivos. [5] Pueden alcanzar una velocidad promedio de 12 a 15 [km/h]. [8] En ciudades congestionadas y para distancias entre 5 y 7 [km], la bicicleta es el medio de transporte más rápido. [9] Además, en un trayecto hecho en bicicleta, el 99% de la energía que deposita el ciclista en los pedales es transferido a las ruedas. Sin embargo, con los mecanismos de transmisión de catarinas, esta cifra puede reducirse entre el 10 y 15%. A pesar de esto, no existe otro medio de locomoción autopropulsada que sea más eficiente que la bicicleta. [10]

1.1.2. Usuario

Para que la bicicleta sea útil, ésta debe complementarse con un usuario que, para trasladarse de un sitio a otro, dependerá en gran medida de su estado físico. Normalmente, una persona con buena condición física puede producir de 3 a 5 [W/kg] por más de una hora; por lo que, si tiene una masa de 70 [kg] podrá desarrollar entre 210 y 350 [W] respectivamente. Además, el consumo de energía humana para el transporte en bicicleta está dado en 1.62 [kJ/km-kg]. [10] Ahora que se ha visto el ensamble de una bicicleta urbana, las partes de la misma y algunos datos generales del usuario, se puede tener una idea de la manera en la que se podrían incorporar los diferentes elementos del sistema neumático con regeneración.

La figura 1.2. representa un bosquejo inicial del acoplamiento de los sistemas: neumático, de transmisión y de control y en general, muestra los elementos de los que estarían conformados.

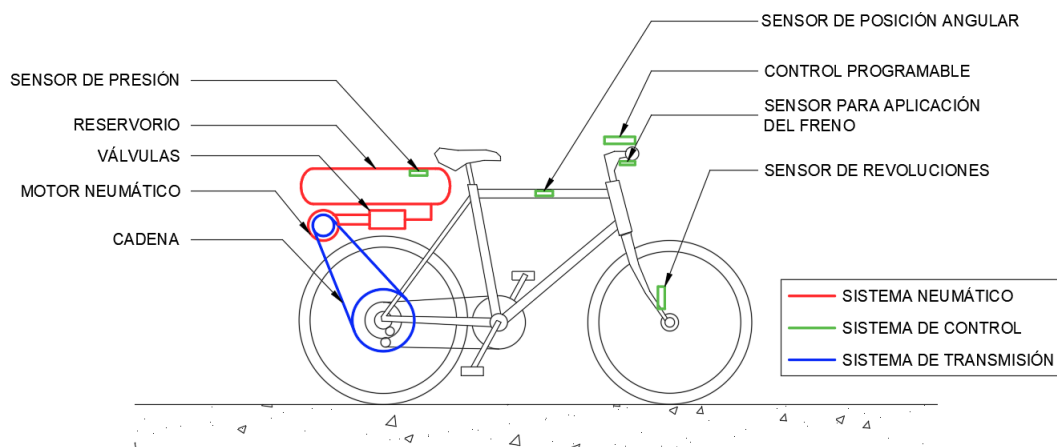


Figura 1.2. Sistemas integrados en la bicicleta urbana.

(Fuente: Propia)

1.2. Energía y regeneración

Una primera aproximación para poder evaluar el dimensionamiento del sistema neumático con regeneración es determinar la cantidad de energía disponible en un escenario dado como por ejemplo un descenso.

1.2.1. Primera ley de la termodinámica o ley fundamental

Establece que “la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma.” [11]

Bajo este concepto, se analiza un escenario en el que un ciclista requiere bajar por cierto plano inclinado (figura 1.3.a). Inicialmente, el ciclista parte del reposo y se encuentra a una altura z de un nivel de referencia que, para este ejemplo, coincide con el nivel más bajo del plano inclinado. El ciclista da un ligero impulso y desciende para, al cabo de un tiempo, llegar al punto dos con una rapidez v (figura 1.3.b).



Figura 1.3. Transformación de la energía potencial en energía cinética.

(Fuente: Propia)

Las ecuaciones 1.1. y 1.2. representan la energía potencial (E_p) y la energía cinética (E_c) respectivamente. Al realizar el balance de energía del sistema usuario-bicicleta, se podrá notar con mayor claridad y de manera matemática la transformación de la energía.

$$E_p = mgz \text{ [J]} \quad (\text{Ec. 1.1.}) \text{ [11]}$$

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \text{ [J]} \quad (\text{Ec. 1.2.}) \text{ [11]}$$

donde:

m : Masa del objeto. [kg]

g : Gravedad. $\left[9.8 \frac{m}{s^2}\right]$

z : Altura. [m]

V : Rapidez del objeto. $\left[\frac{m}{s}\right]$

1.2.2. Balance de Energía

La energía mecánica de un sistema es aquella que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo. Para evaluar el cambio de energía de dicho sistema, se requiere determinar su energía al inicio y al final para luego encontrar la diferencia entre estos dos estados. [11] La ecuación 1.3. expresa la energía mecánica que aplica para el sistema que en este caso es una bicicleta.

$$\Delta E_{Mecánica} = m \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) [J] \quad (\text{Ec. 1.3.}) [11]$$

Si el ciclista desciende por el plano inclinado sin pedalear, el cambio de energía mecánica es cero y sustituyendo los valores en el punto uno y dos de la figura 1.3. se tiene:

$$0 = m \left(\frac{v^2 - 0}{2} + g(0 - z) \right) [J]$$

$$mgz = m \frac{v^2}{2} [J]$$

$$E_p = E_c [J] \quad (\text{Ec. 1.4}) [11]$$

La ecuación 1.4. indica matemáticamente la conservación de la energía. Este ejemplo ilustra una situación en la que el ciclista aprovecha toda la energía potencial para terminar en el punto dos con cierta velocidad v . Sin embargo, en la mayor parte de descensos en bicicleta en una ciudad, se requiere un control de la rapidez. El ciclista debe frenar paulatinamente para trasladarse de manera segura y evitar accidentes. El frenado de la bicicleta involucra cierta energía que se desperdicia debido a la fricción entre las pastillas de freno con el disco. Esta fricción por su parte genera calor y así, la energía de frenado se convierte en calor disipado hacia los alrededores en donde no tiene utilidad. Esta energía que se desperdicia puede ser útil si se la transforma mediante un proceso de “regeneración”.

1.2.3. Regeneración

Existen muchas aplicaciones del término regeneración. Según el diccionario de la RAE, “regenerar” en el ámbito tecnológico quiere decir: Someter las materias desechadas a determinados tratamientos para su reutilización. Es así que el freno regenerativo comúnmente conocido en los automóviles híbridos y eléctricos, emplean este término para referirse a una tecnología que permite reducir la velocidad del automóvil mediante un

generador eléctrico que emplea la energía cinética del vehículo para generar energía eléctrica y almacenarla en una batería. El término además abarca muchas otras formas de almacenamiento, incluyendo la conversión de energía en forma hidráulica o neumática. [12] Por lo tanto, la regeneración es el proceso que se empleará para transformar la energía cinética en energía neumática.

Es importante mencionar que el freno regenerativo no reemplaza los frenos convencionales que emplean la fricción para disminuir la velocidad del objeto. Puede cumplir sus funciones hasta llegar a una velocidad mínima que, para el caso particular de la bicicleta, será determinada en el capítulo 3 (Pruebas y Análisis de Resultados). Si el ciclista desea llevar su bicicleta al reposo, los frenos convencionales son lo que ejecutan esta acción.

La figura 1.4. indica tres estados y dos procesos en los que sucede el descenso de un ciclista.

- Proceso A.- Corresponde al trayecto realizado por el ciclista desde el reposo (estado 1) hasta el instante en el que alcanza la rapidez máxima (estado 2). La rapidez máxima es aquella que le permite al ciclista desplazarse de manera segura en la ciudad ante un descenso.
- Proceso B.- Corresponde al trayecto en el que el ciclista se mantiene en velocidad constante (estado 2 al 3).

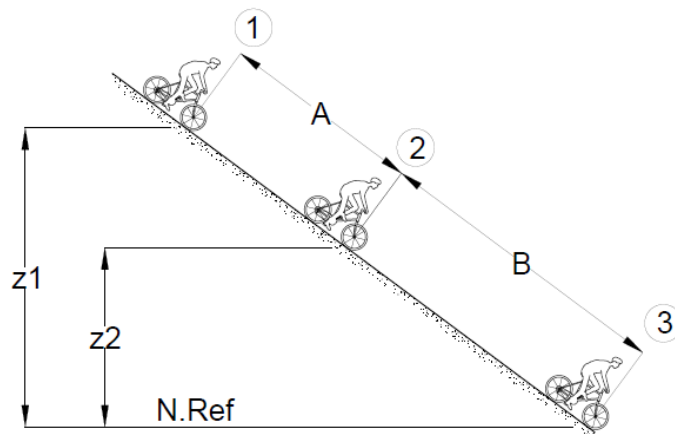


Figura 1.4. Identificación de los tramos de descenso del ciclista.

(Fuente: Propia)

Al aplicar la ecuación 1.3. al proceso A y asumiendo que el ciclista no introduce energía alguna para acelerarse ($\Delta E_{Mecánica} = 0$), se tiene la ecuación 1.5.

$$0 = m \left(\frac{V_{seg}^2 - 0}{2} + g(z_2 - z_1) \right) [J] \quad (\text{Ec. 1.5.})$$

donde:

V_{seg} : Rapidez máxima de seguridad. $\left[\frac{m}{s} \right]$

Sin embargo, dado que el ciclista puede o no introducir energía al sistema (pedalear o frenar), es necesario considerar el caso más conservador, el mismo que implica tener la mayor variación de velocidad y la mayor variación de alturas, de esta manera la energía de regeneración se hace máxima y se podrá estimar para el diseño. La ecuación 1.6. indica la energía de regeneración máxima disponible en el todo el proceso y que es igual a la energía mecánica del sistema ($\Delta E_{Mecánica} = E_{Reg}$).

$$E_{Reg} = m \left(\frac{V_{seg}^2 - V_{max}^2}{2} + g(0 - z_1) \right) [J]$$

$$E_{Reg} = m \left(\frac{V_{seg}^2 - V_{max}^2}{2} - g \cdot z_1 \right) [J] \quad (\text{Ec. 1.6.})$$

Al analizar el primer término del paréntesis de la ecuación 1.6., se puede definir que será negativo porque la velocidad de seguridad será siempre menor que la máxima a la que llegará el ciclista. Por otro lado, el signo del segundo término es negativo por lo que la ecuación completa tiene signo negativo lo que representa físicamente que el sistema ha absorbido esa energía.

1.2.4. Aportación

Para el presente proyecto, la “aportación” es físicamente un proceso contrario a la regeneración, debido a que se ejecuta durante un ascenso y además introduce energía al motor para suplir en cierto porcentaje el esfuerzo del usuario.

1.3. Sistema de Transmisión

El sistema de transmisión hace posible que la fuerza del ciclista se transfiera hacia la rueda posterior mediante el pedaleo. Sus componentes principales son: las catarinas (ruedas dentadas), cadenas, biela y pedal. Para su funcionamiento, el ciclista ejerce fuerza sobre el pedal, provocando un momento torsor en el plato. A su vez, los eslabones de las cadenas giran entre sí para acoplarse al diámetro de paso de la catarina para generar el movimiento

y transmitirlo hacia la rueda posterior. Este tipo de transmisión requiere lubricación de aceites livianos para su mantenimiento y óptimo funcionamiento.

Se abordarán las particularidades del sistema de transmisión comenzando por algunos conceptos importantes tales como la relación de transmisión, torque y potencia. Más adelante se describirán los elementos principales conjuntamente con los parámetros para su dimensionamiento.

1.3.1. Relación de transmisión

La relación de transmisión, también llamada relación de velocidad, indica la relación entre la velocidad angular del engrane de entrada a la del engrane de salida para un par de engranes. [13]

Al aplicar este concepto al sistema de transmisión de una bicicleta, se observa en la figura 1.5. que la catarina motriz o plato tendrá una velocidad angular definida por el pedaleo del usuario, mientras que la catarina impulsada tendrá una velocidad angular diferente. La ecuación 1.7. indica la relación de velocidades.

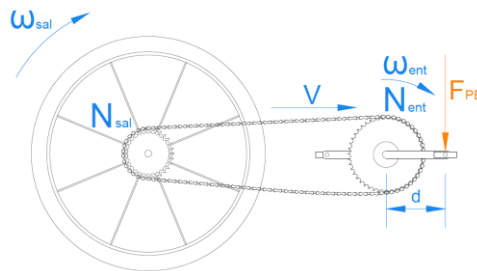


Figura 1.5. Sistema de transmisión de una bicicleta.
(Fuente: Propia)

$$m_v = \frac{\omega_{ent}}{\omega_{sal}} = \frac{r_{sal}}{r_{ent}} = \frac{N_{sal}}{N_{ent}} \quad (\text{Ec. 1.7.}) [13]$$

donde:

ω : Velocidad angular. $\left[\frac{rad}{s}\right]$

r : Radio. $[m]$

N : Número de dientes.

Siendo el subíndice *ent* (*entrada*) para designar la característica del elemento motriz y *sal* (*salida*) para la del elemento conducido.

El mecanismo catarina-cadena descrito será incorporado al sistema neumático por las siguientes razones:

- La potencia nominal para el diseño será aquella que represente al menos la mitad de la potencia que puede aportar un usuario estándar (no profesional, pero si en buen estado físico).
- El conjunto de catarinas de la piñonera ubicada en el eje de la rueda posterior puede servir para el acoplamiento del nuevo sistema.

El sistema de transmisión del sistema neumático se muestra en la figura 1.6. en el que se indican las variables que intervienen.

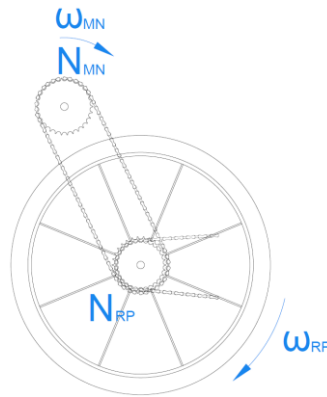


Figura 1.6. Relación de velocidades para el sistema de transmisión neumático.

(Fuente: Propia)

En este caso, la velocidad angular de entrada estará dada por la velocidad angular de la rueda posterior y la velocidad angular de salida será la del eje del motor neumático. La ecuación 1.8. expresa la relación de velocidad para el sistema de transmisión.

$$m_{vST} = \frac{\omega_{RP}}{\omega_{MN}} = \frac{r_{MN}}{r_{RP}} = \frac{N_{MN}}{N_{RP}} \quad (\text{Ec. 1.8.})$$

Donde el subíndice RP se emplea para designar la característica de la rueda posterior y MN para el motor neumático.

Para definir la velocidad angular de la rueda posterior, primero es necesario definir la rapidez máxima de la bicicleta para el intervalo de regeneración mediante la ecuación 1.9.

$$v = r\omega \left[\frac{m}{s} \right] \quad (\text{Ec. 1.9.}) [14]$$

La ecuación 1.10. representa la velocidad angular de la rueda posterior cuando la bicicleta ha alcanzado la rapidez máxima para iniciar el proceso de regeneración

$$\omega_{RP} = \frac{v_{max}}{r} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (\text{Ec. 1.10.})$$

1.3.2. Torque

Mediante el diagrama de cuerpo libre (DCL) de la bicicleta y el usuario en posición de descenso, se encontrará el torque que se genera debido a la energía potencial gravitacional. La figura 1.7. indica el DCL mencionado, en el instante del estado 2 de acuerdo a la figura 1.4.

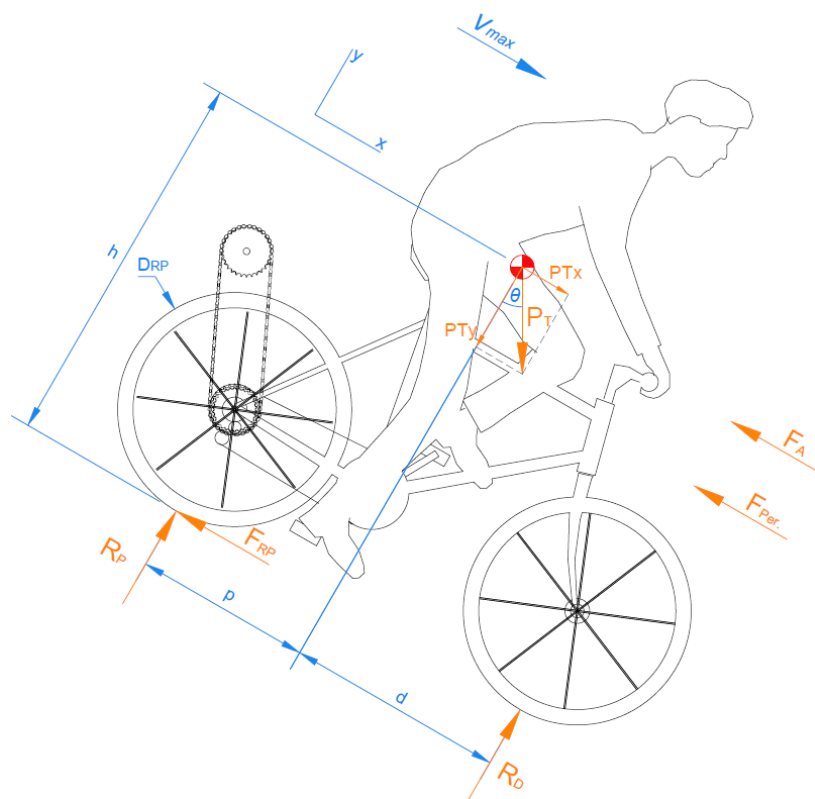


Figura 1.7. DCL bicicleta y usuario en descenso.

(Fuente: Propia)

En el DCL se pueden identificar las fuerzas que actúan sobre el sistema en el instante mencionado. Así, se tiene la fuerza aerodinámica F_A generada por la resistencia que ejerce el aire en cada instante que el ciclista ocupa un nuevo espacio [15]. La ecuación 1.11. la identifica.

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot C_v \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 [N] \quad (\text{Ec. 1.11.}) [15]$$

donde:

C_v : Coeficiente de geometría. (0.9) [15]

ρ : Densidad del aire. $(1,3 \left[\frac{kg}{m^3} \right])$ [15]

A : Área de la sombra proyectada en un plano perpendicular al movimiento. $(0,45 [m^2])$ [15]

V : Velocidad relativa entre el ciclista y el viento. $\left[\frac{m}{s} \right]$

Con fines prácticos, se tomará la velocidad del viento cero (estático) para de esta manera cuantificar la fuerza que el ciclista debe vencer. Así, el factor V será igual a la velocidad de la bicicleta.

La fuerza $F_{Per.}$, está asociada con las pérdidas mecánicas en los elementos en movimiento y también con las pérdidas de rodadura. Se estima en $4[N]$ para bicicletas de competencia. [15] A lo largo del presente trabajo se tomarán estos valores de referencia, tanto para definir F_A como para $F_{Per.}$ con el fin de incluir todas las fuerzas y aproximar las ecuaciones a un modelo real.

La componente del peso total en el eje x es P_{Tx} y en el eje y es P_{Ty} . Las ecuaciones 1.12. y 1.13. las identifican respectivamente.

$$P_{Tx} = P_T \sin \theta [N] \quad (\text{Ec. 1.12.})$$

$$P_{Ty} = P_T \cos \theta [N] \quad (\text{Ec. 1.13.})$$

donde:

P_T : Peso total bicicleta y usuario. $[N]$

θ : Ángulo de inclinación. $[rad]$

Ahora, se aplican las ecuaciones cinéticas al sistema en el eje x para obtener la fuerza de rozamiento que se genera en la rueda posterior representada por la ecuación 1.14.

$$\sum F_x = 0 [N] \quad [14]$$

$$P_{Tx} - F_{RP} - F_A - F_{Per.} = 0 [N]$$

$$F_{RP} = P_{Tx} - F_A - F_{Per.} [N] \quad (\text{Ec. 1.14.})$$

donde:

F_{RP} : Fuerza de rozamiento en la rueda posterior. [N]

Al sustituir las ecuaciones 1.11. y 1.12. en la ecuación 1.14. se obtiene la ecuación 1.15. en términos de variables conocidas.

$$F_{RP} = P_T \sin \theta - \frac{1}{2} \cdot C_v \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 - F_{Per}. [N]$$

$$F_{RP} = P_T \sin \theta - 0,263 V^2 - 4 [N] \quad (\text{Ec. 1.15.})$$

De esta manera, el torque generado en el descenso está representado por la ecuación 1.16. y es la multiplicación de la fuerza de rozamiento en la rueda posterior y la distancia del eje de la rueda al asfalto.

$$T_q = F_{RP} \cdot \frac{D_{RP}}{2} [N \cdot m] \quad (\text{Ec. 1.16.}) [11]$$

donde:

T_q : Torque. [N.m]

D_{RP} : Diámetro de la rueda posterior. [m]

Las ecuaciones cinéticas también se aplican al eje y, obteniéndose la ecuación 1.17.

$$\sum F_x = 0 [N] \quad [14]$$

$$R_P + R_D - P_{Ty} = 0 [N] \quad (\text{Ec. 1.17.})$$

De las tres variables, únicamente se conoce una y cualquiera de las dos desconocidas puede ser encontrada mediante la sumatoria de momentos respecto de cualquier punto en donde se aplican las fuerzas que se desconocen. Se toma el punto de contacto en rueda delantera y el asfalto para efectuar la sumatoria de momentos y se escribe la ecuación 1.18.

$$\sum M = 0 [N] \quad [14]$$

$$P_{Ty} \cdot d - R_P \cdot (d + p) = 0 [N] \quad (\text{Ec. 1.18.})$$

Al reemplazar P_{Ty} por la ecuación 1.13., la reacción normal en la rueda posterior R_P queda escrita mediante la ecuación 1.19.

$$R_p = \frac{P_T \cos \theta \cdot d}{d+p} [N] \quad (\text{Ec. 1.19.})$$

Esta reacción se empleará en la fase de diseño para que, de acuerdo a los valores encontrados de fuerza de rozamiento, torque y potencia, se establezca el límite en el que se cumpla la ecuación 1.20., para que la rueda no deslice en el momento que el conjunto usuario-bicicleta se encuentre en un descenso y desee efectuar la regeneración.

$$F_{RP} \leq \mu R_p [N] \quad (\text{Ec. 1.20.})$$

donde:

μ : Coeficiente de rozamiento estático llanta-asfalto seco.(0,8 – 0,9) [15]

R_p : Reacción en la rueda posterior. [N]

Al realizar exactamente el mismo ejercicio para la obtención del torque, con la diferencia de que esta vez, el conjunto usuario bicicleta se encuentran en posición de ascenso (figura 1.8) se obtienen las siguientes ecuaciones:

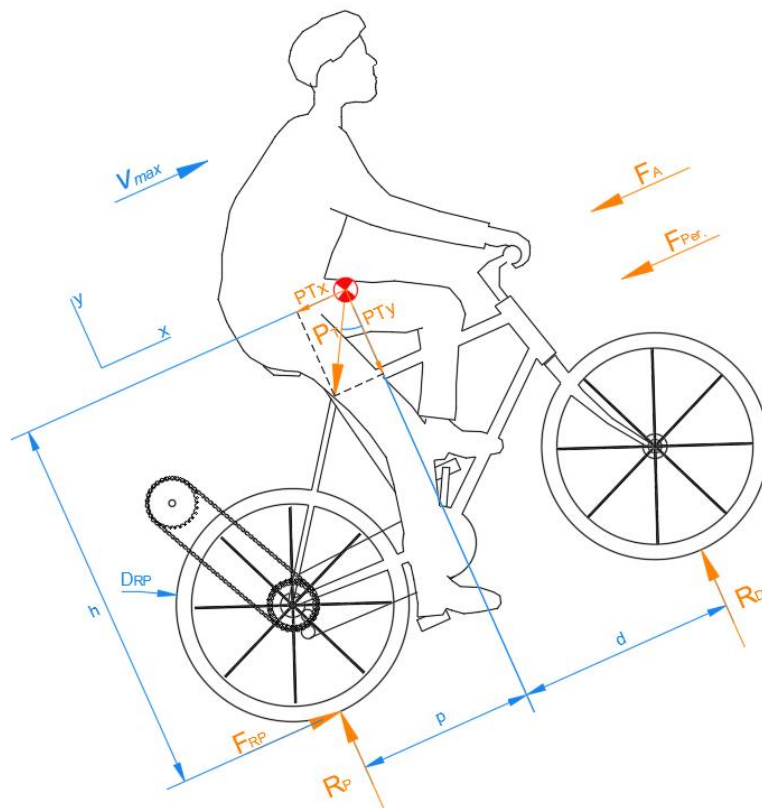


Figura 1.8. DCL bicicleta y usuario en ascenso.

(Fuente: Propia)

$$F_{RP} = P_{Tx} + F_A + F_{Per}. [N] \quad (\text{Ec. 1.21.})$$

$$F_{RP} = P_T \sin \theta + 0,263 V^2 + 4 [N] \quad (\text{Ec. 1.22.})$$

De esta manera, al reemplazar las ecuaciones 1.21. y 1.22. en la ecuación 1.16. se obtendrá el torque requerido para el proceso de aportación.

1.3.3. Potencia

La potencia de un sistema rotatorio se define mediante el trabajo realizado por unidad de tiempo. La ecuación 1.23. expresa la potencia al eje de la rueda posterior:

$$\dot{W}_{eje} = \omega_{RP} \cdot T_q [W] \quad (\text{Ec. 1.23.}) [11]$$

1.3.4. Catarinas

Las catarinas son ruedas dentadas unidas al eje y se acoplan con una cadena. Sus dientes están diseñados para ajustarse al eslabón de la cadena y por lo tanto, la dimensión de los dientes varía de acuerdo a la dimensión del eslabón de la cadena. [16] La figura 1.9. indica las partes de una catarina.

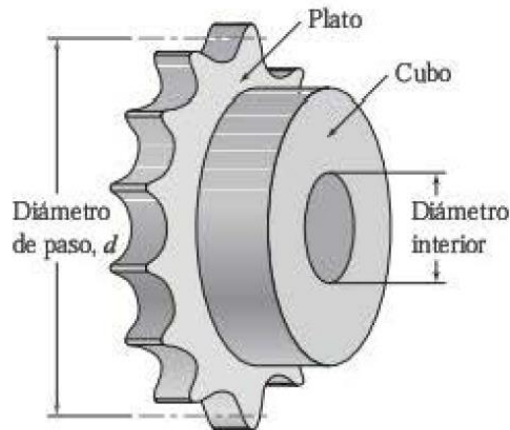


Figura 1.9. Partes de una catarina. [16]

1.3.5. Cadenas

Las cadenas son elementos que transmiten el movimiento giratorio y torque de un eje a otro de manera suave, silenciosa e involucrando un bajo costo en el sistema. Su flexibilidad las hace óptimas para conseguir el movimiento de varios ejes. Entre las ventajas más importantes se destacan: menor costo que transmisiones de engranes, no sufren deslizamiento como las correas, distancias flexibles entre centros de ejes, mayor vida útil que las correas, no se deterioran con el calor, el aceite o la antigüedad y requieren mínimos

ajustes al pasar el tiempo. [16] La figura 1.10. muestra la identificación de las dimensiones de una cadena de doble torón.

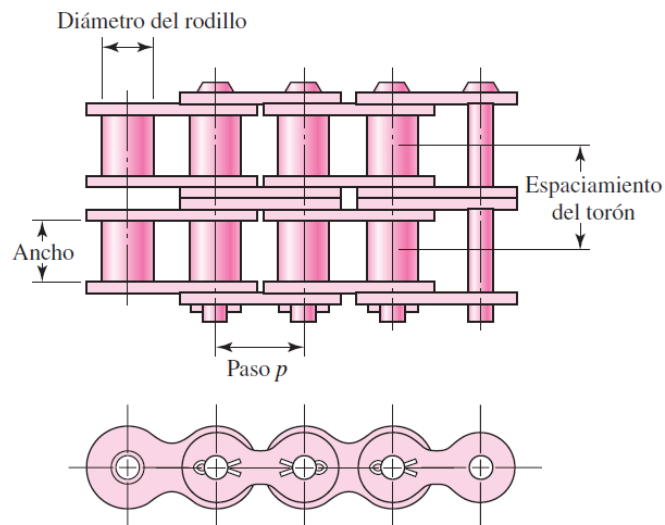


Figura 1.10. Identificación de las dimensiones de una cadena de doble torón. [17]

Para poder identificar las distintas propiedades que una cadena tiene, la ANSI (American National Standards Institute) creó un estándar con el fin de asociar determinadas dimensiones, resistencias mínimas a la tensión, peso por unidad de longitud, etc. En el capítulo 2 se identificará el número ANSI para las cadenas de rodillos empleados en bicicletas urbanas.

1.4. Sistema Neumático

Un sistema neumático es un sistema de potencia fluida, capaz de efectuar una tarea útil. La transmisión de la energía e información se efectúa por medio de un vehículo fluido que para el presente caso es el aire. [10]

Para que un sistema neumático funcione adecuadamente, se deben manejar tres variables que son: la presión del fluido, el caudal desplazado y la dirección del flujo. Por lo tanto, la función de los elementos de un sistema neumático está relacionada con el manejo de las variables antes mencionadas. [10]

La figura 1.11. muestra un gráfico general de los elementos requeridos para el sistema neumático que del presente estudio. Se puede observar que el proceso comienza con un compresor que envía el aire comprimido al tanque de almacenamiento o reservorio. En el reservorio se encuentran elementos de control y medición como el manómetro, el presostato y la válvula de alivio. Luego, el aire comprimido pasa a través de una unidad de

mantenimiento y posteriormente una válvula direcciona la presión del aire hacia el motor neumático. Finalmente, el aire sale a presión atmosférica luego de pasar por una válvula reguladora de caudal.

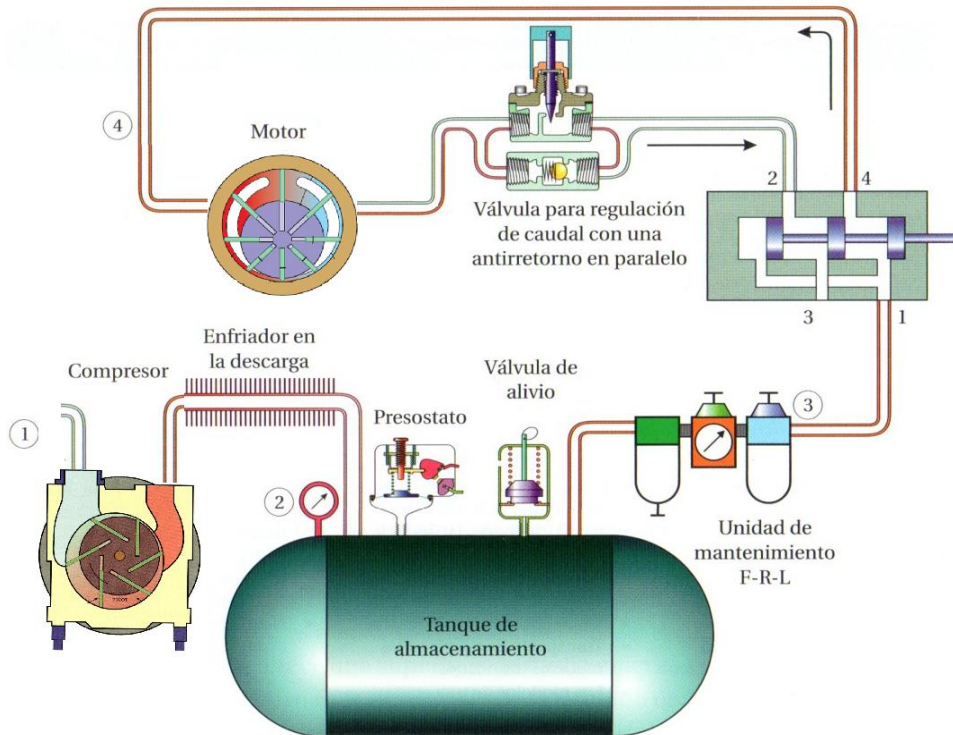


Figura 1.11. Elementos principales de un sistema neumático. [10]

Existen dos normas que hacen referencia a la a los símbolos gráficos y diagramas simbólicos de los sistemas de potencia fluida. Estas normas son: ISO 1219-1:2006 (Fluid power systems and components – Graphic symbols and circuit diagrams – Part 1: Graphic and symbols for conventional use and data-processing applications) y ISO 1219-2:1995 (Fluid power systems and components – Graphic symbols and circuit diagrams – Part 1: Graphic and symbols for conventional use and data-processing applications). Los diagramas detallados en las figuras del presente capítulo serán representados mediante dichas normas. [10]

1.4.1. Compresor

Los compresores son dispositivos que comprimen el fluido para distintos usos tales como el almacenamiento, el transporte o un uso final como convertir la presión en trabajo mecánico. La figura 1.12. muestra los tipos de compresores en Capacidad [l/s] vs Presión [Bar]. Para los fines del presente trabajo, se describirán los alternativos (reciprocantes) y rotativos.

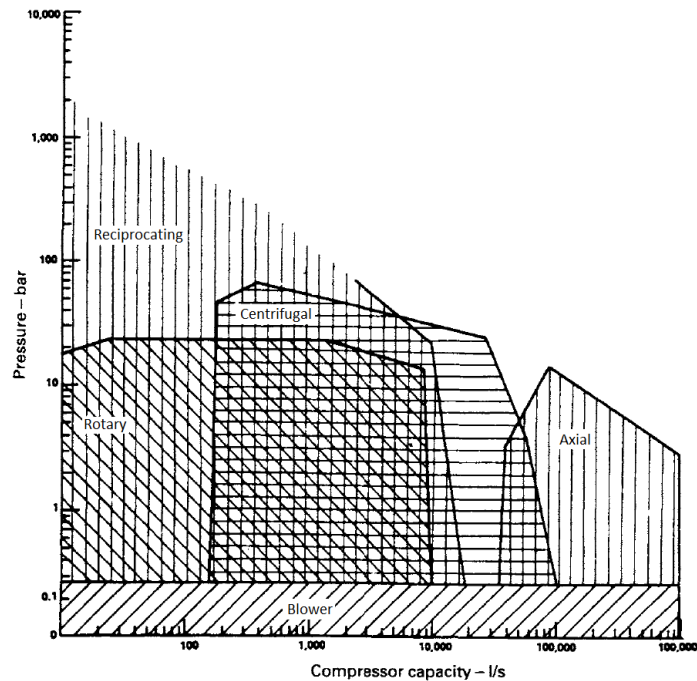


Figura 1.12. Tipos de compresores Capacidad vs Presión. [18]

Los compresores alternativos poseen una o más cámaras cilíndricas en las que un pistón se mueve alternativamente introduciendo aire a la cámara y posteriormente empujándolo por una válvula de descarga hacia el tanque de almacenamiento. Este movimiento de vaivén lo realiza mediante el mecanismo de biela manivela.

Por otro lado, se encuentran los compresores rotatorios que tienen ventajas como la entrega uniforme de caudal, menor ruido, ausencia de vibraciones, más compactos, portátiles y algunos libres de aceite. Los compresores de tornillos helicoidales y los de paletas deslizables son ejemplos de este tipo de compresores rotatorios. En la figura 1.13 se tiene un gráfico en corte de las partes de un compresor de paletas deslizables. [10]

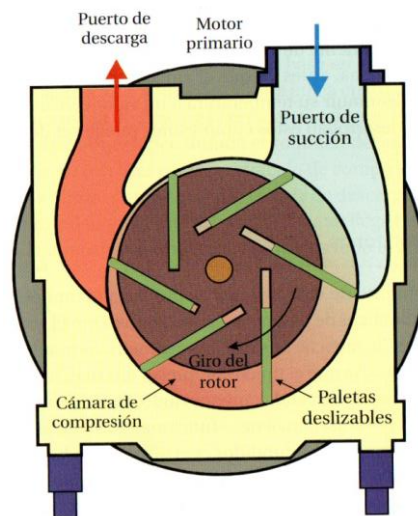


Figura 1.13. Compresor de paletas. [10]

La cuantificación del caudal en un sistema neumático se realiza mediante la medición de las presiones en los puntos 1 y 4 de la figura 1.11. Estas mediciones permiten conocer la relación de compresión expresada mediante la ecuación 1.24.

$$RC = \frac{P_4}{P_1} = \frac{V_1}{V_4} \quad (\text{Ec. 1.24.}) [10]$$

Se debe tener en cuenta que P_1 es la presión atmosférica y que P_4 es la presión que llega al actuador y debe ser absoluta, es decir $P_4 = P_1 + P_{manométrica}$. Finalmente, el caudal en condiciones de aire libre estará expresado mediante la ecuación 1.25.

$$\dot{Q} = \frac{Vol \cdot RC}{t} \quad (\text{Ec. 1.25.}) [10]$$

donde:

t : Tiempo requerido para llenar el cilindro.

Vol : Volumen ingresado a la cámara.

1.4.2. Reservorio

Llamado también tanque receptor o tanque de almacenamiento, es un recipiente que acumula el aire comprimido entregado por el compresor. Está provisto con puertos para salida e ingreso de aire, otro puerto para un manómetro conjuntamente con un interruptor de presión que controla el encendido y apagado de acuerdo a las presiones mínimas y máximas con las que opera el sistema. Adicionalmente cuenta con una válvula de alivio, que resguardará la integridad del recipiente en el caso de una sobrepresión, y con un drenaje para la extracción de condensados.

Su funcionamiento se muestra en la figura 1.14. y en la misma se puede observar que la presión del sistema (línea verde) está siempre por debajo de la línea P_2 que indica el límite mínimo al cual el compresor deberá encenderse para volver a cargar hasta la P_1 que es la presión máxima que debe alcanzar dentro del reservorio. La línea negra indica los ciclos de carga (ascendentes) y de descarga (descendentes) que suceden a lo largo del tiempo.

Figura 1.14. Operación del tanque de almacenamiento

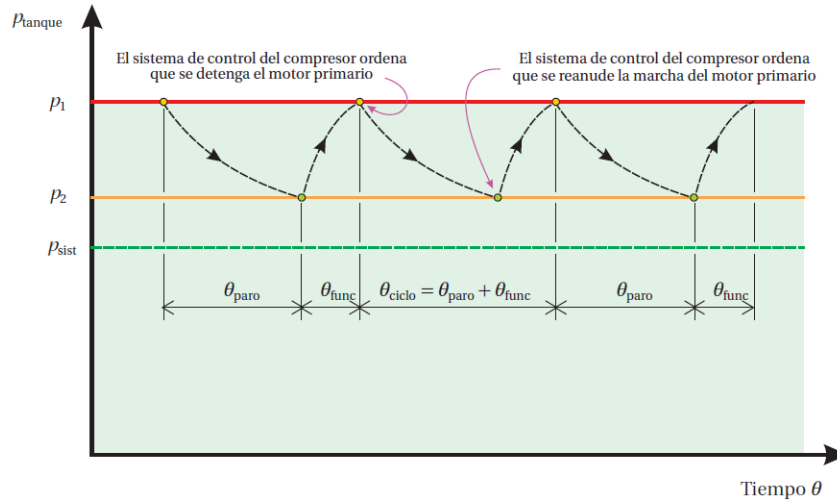


Figura 1.14. Operación del tanque de almacenamiento. [10]

1.4.3. Presostato

Este dispositivo se emplea para controlar la marcha y paro del motor primario. En la figura 1.15. se muestra un presostato en corte, en el que se puede ver un conjunto de resortes calibrados previamente que activan o desactivan un interruptor a la vez que enciende o apaga el motor primario del compresor. De esta manera se controla el encendido y apagado del compresor, protegiendo el tanque de almacenamiento y permitiéndole trabajar en el rango requerido por las facilidades neumáticas.

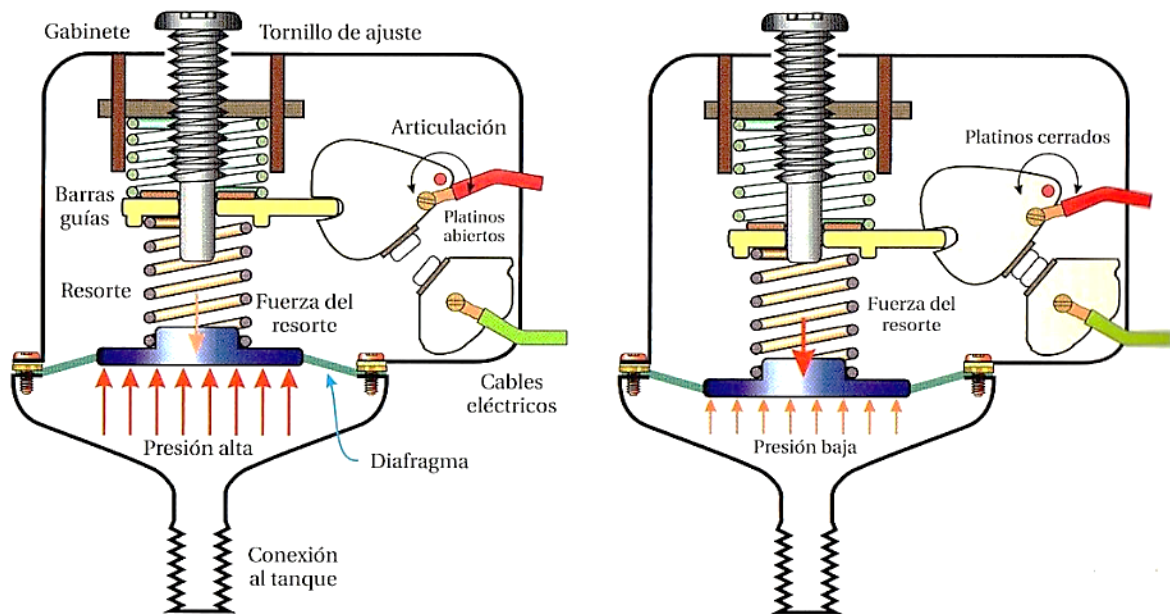


Figura 1.15. Posiciones del presostato para interrupción eléctrica. [10]

1.4.4. Unidad de tratamiento

Llamadas también unidades de preparación de aire o FRL. Son un conjunto modular que incluye un filtro, un regulador de presión, un lubricador y un manómetro. El ajuste de su funcionamiento puede ser manual, señal análoga de voltaje o de corriente, señal neumática e incluso hasta por interfase digital. Se producen en una gama muy amplia de tallas y accesorios para montaje, sujeción y acoplamiento de las mismas. La figura 1.16. indica algunos modelos de unidades de tratamiento.

La selección de la unidad de tratamiento se debe realizar en función de: el intervalo de regulación de la presión, el caudal máximo de aire, el valor máximo de la presión de alimentación y el tamaño mínimo de las partículas que debe retener el filtro.



Figura 1.16. Modelos de unidades de tratamiento. [10]

1.4.5. Líneas de transporte del fluido

Estos elementos son aquellas que permiten que la potencia del fluido sea direccionada diferentes longitudes hacia diferentes sectores para hacer útil dicha potencia. Existen sistemas que pueden estar provistos de tubos de acero galvanizado o cobre. Estas líneas requieren de soportes cada cierto tramo para sostenerlas. Otro tipo de sistemas son aquellos que tienen mangueras. Éstas ofrecen flexibilidad por lo que pueden desplazarse de un lugar a otro sin dificultades. La figura 1.17 refleja un tipo de instalación para transporte de fluido.

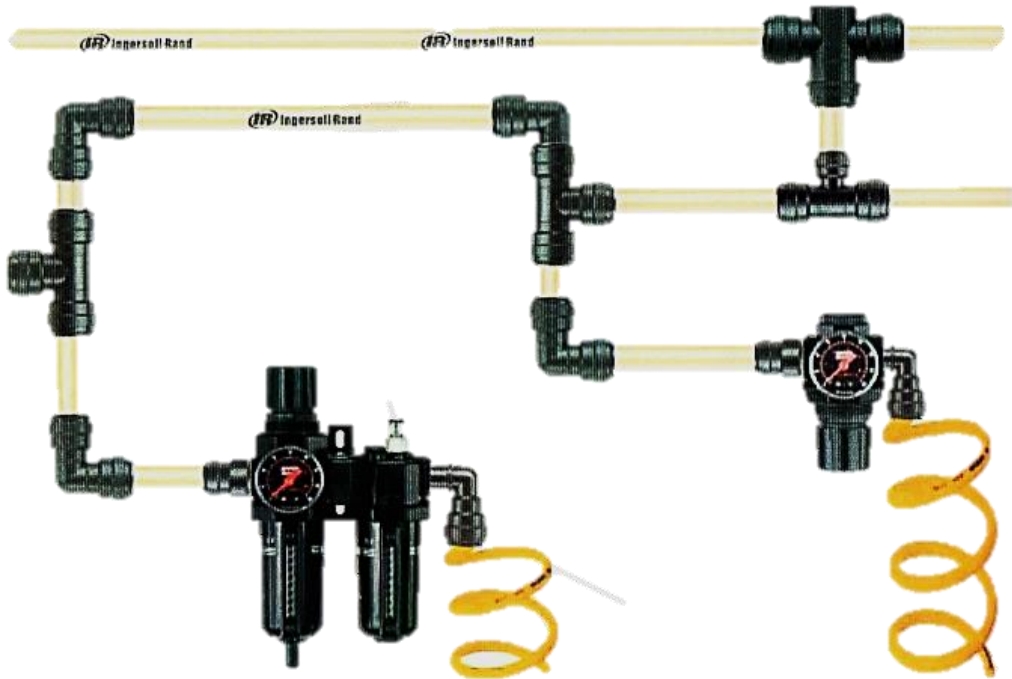


Figura 1.17. Líneas para transporte de fluido. [10]

1.4.6. Válvulas

Son dispositivos que controlan la dirección, el caudal y la presión del fluido. En el sistema neumático, las válvulas sirven para ejecutar una acción determinada al controlar las vías por las que el fluido debe transportarse y así llegar a un actuador.

Existen varios tipos de válvulas que para las aplicaciones neumáticas son importantes y son:

Válvulas para Control Direccional:

Direccionan el fluido por el camino que se ha configurado para el sistema. Por ejemplo, permite tanto extraer como introducir el fluido al cilindro de un actuador, ejecutando su desplazamiento. El cuerpo tiene varios orificios que permiten el paso del fluido de acuerdo a un conmutador de émbolos que puede tomar 2 o 3 posiciones para enviar el fluido de acuerdo a su configuración interna. Estas posiciones pueden ser controladas ya sea mediante un operador, una fuerza de presión fluida o una fuerza electromagnética, etc.

La figura 1.18. indica el funcionamiento de una válvula de tres vías y dos posiciones conjuntamente con su representación simbólica para cada posición.

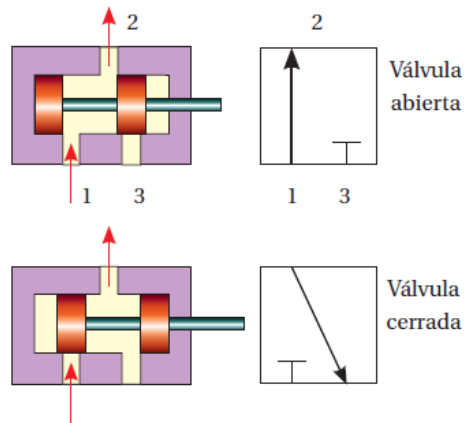


Figura 1.18. Válvula de tres vías y dos posiciones. (3/2) [10]

Adicionalmente la figura 1.19. muestra un diagrama de la válvula 3/2 actuada por palanca, con retorno por resorte a) normalmente abierta y b) normalmente cerrada. La denominación de normalmente abierta o cerrada, aplica únicamente para válvulas de 2 o 3 vías. Para las de mayor número de vías, la válvula no puede establecer una posición de cerrado o abierto.

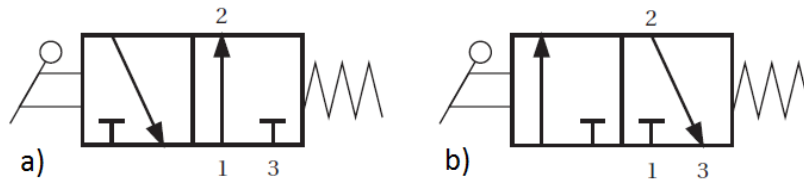


Figura 1.19. Simbología de la válvula 3/2: a) normalmente abierta, b) normalmente cerrada. [10]

Existen además válvulas de 4 y de 5 vías con dos posiciones (4/2 y 5/2 respectivamente). La figura 1.20. muestra la simbología de una válvula 4/2 actuada por doble piloto, mientras que la figura 1.21. muestra una válvula 5/2. Ambas son biestables. La señal piloto implica una señal de presión de baja potencia, que al ser recibida por el diafragma de la válvula piloto. Posteriormente esta presión genera el movimiento del conmutador.

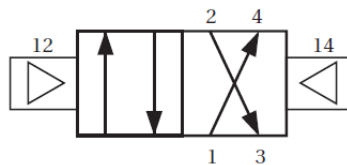


Figura 1.20. Simbología de la válvula 4/2 actuada por doble piloto, biestable. [10]

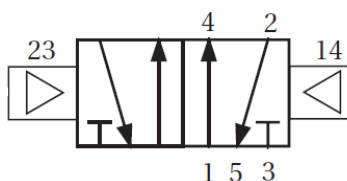


Figura 1.21. Simbología de la válvula 5/2 actuada por doble piloto, biestable. [10]

Válvulas para Regulación de Caudal:

Este tipo de válvulas sirve para imponer un control sobre el flujo que se transporta a través del sistema, obteniendo consecuentemente un control sobre la velocidad de avance de un actuador. Dado que la velocidad de avance o retroceso de un actuador es diferente, estas válvulas se emplean en aplicaciones en las que se requiere controlar dichas velocidades.

La válvula reguladora tiene un orificio variable mediante un giro que el usuario hace sobre el vástago y éste a su vez modifica la apertura del orificio. La figura 1.22 indica un corte de una válvula de aguja de regulación de caudal bidireccional con orificio variable y su respectivo símbolo.

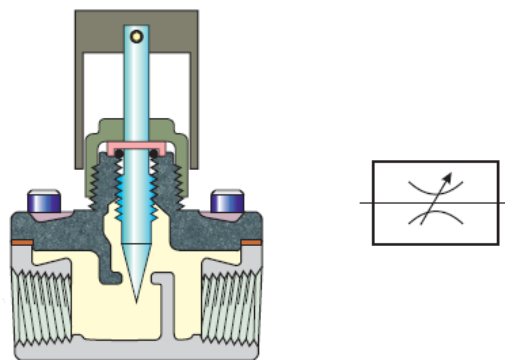


Figura 1.22. Válvula de aguja de regulación de caudal bidireccional con orificio variable. [10]

Por otro lado, también existen las válvulas reguladoras de caudal unidireccionales y su funcionamiento implica el uso de una válvula anti retorno en paralelo tal como muestra el corte y el símbolo de la figura 1.23.

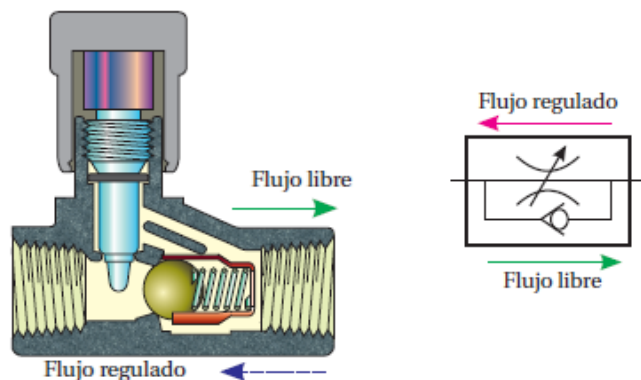


Figura 1.23. Válvula de regulación de caudal unidireccional con orificio variable. [10]

Válvulas de Regulación de Presión:

Éstas se emplean con el objetivo de cambiar la fuerza o el par torsor que un actuador ejerce sobre la carga externa. La regulación de la presión también puede ser necesaria en los

sistemas de control porque generalmente conducen información a presiones bajas en comparación con la presión de operación de los sistemas neumáticos.

Varios métodos de regulación de presión son empleados en este tipo de válvulas. Hay las válvulas reguladoras de presión sin orificio de venteo, con orificio de venteo o alivio y operadas por piloto.

Las válvulas sin orificio de venteo son de construcción sencilla. Funcionan como una válvula normalmente abierta y comienzan a cerrarse cuando la presión aumenta en el puerto secundario y se comunica a la parte baja del pistón mediante el pasaje piloto. El pistón sube conjuntamente con el tapón, reduciendo el tamaño de la abertura y controlando el ingreso de aire hacia el puerto secundario. La figura 1.24. muestra el funcionamiento y la representación del símbolo neumático de la válvula.

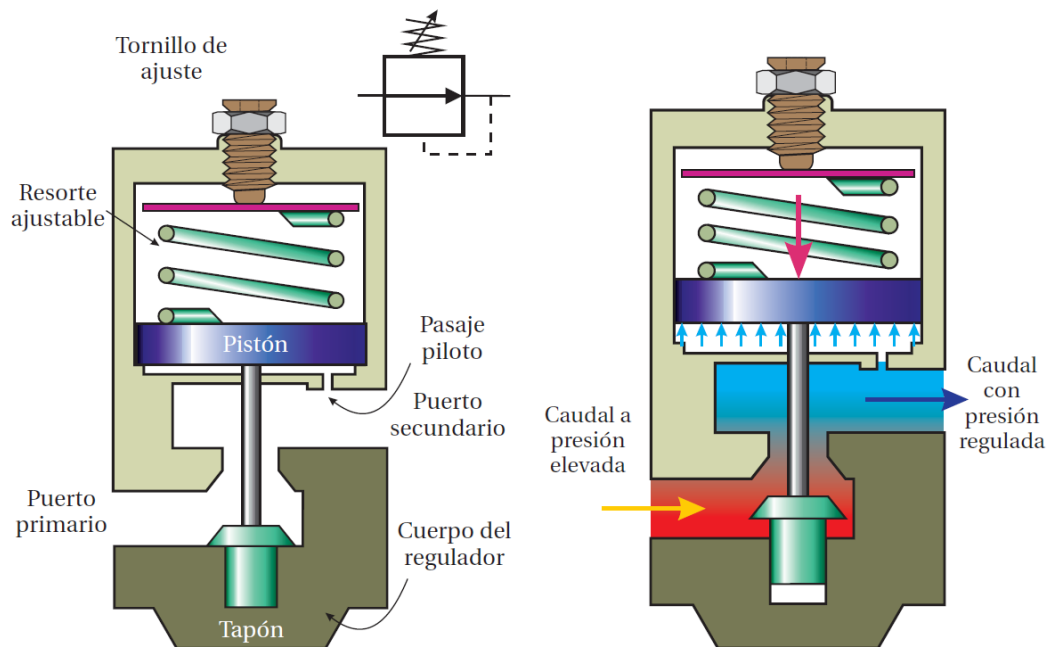


Figura 1.24. Funcionamiento de la válvula reguladora sin orificio. [10]

Las válvulas con orificio de venteo o alivio son similares a aquellas sin orificio con la diferencia de que éstas liberan la presión excesiva de la línea aguas abajo del regulador. La figura 1.25 muestra la posición inicial de la válvula y luego se ve como el pistón sube conjuntamente con el tapón por efecto de la presión en el puerto secundario hasta el punto en el que el tapón deja de subir. En ese instante, el pistón sigue subiendo, dejando abierto un orificio por el cual el aire a presión pasa a la cámara del resorte ajustable y finalmente sale por el orificio de alivio.

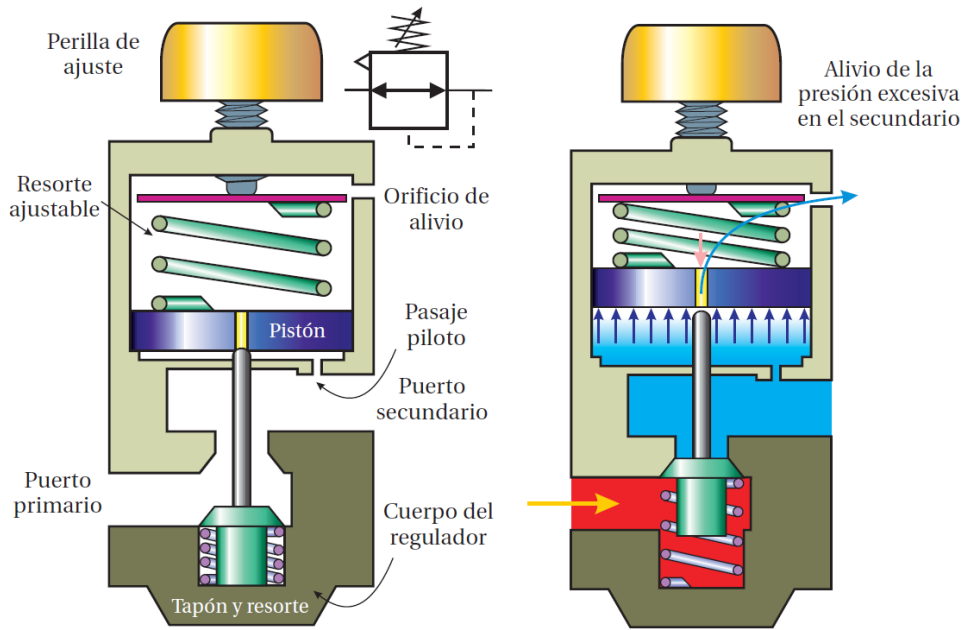


Figura 1.25. Funcionamiento de la válvula reguladora con orificio de venteo. [10]

Las válvulas operadas por piloto tienen dos ventajas sobre aquellas con orificio de alivio. La primera es que, si en el piloto se deja de enviar presión, la válvula se cerrará, funcionando como una válvula de dos vías de dos posiciones. La segunda es que la presión ejercida por la señal piloto permanece constante, a diferencia de la fuerza que ejerce un resorte que básicamente varía linealmente con su desplazamiento, haciendo cada vez más rígida su compresión, lo que se traduce en una mayor precisión en el puerto secundario. En la figura 1.26. se observa que la presión en la línea del puerto secundario se ajusta mediante un comando remoto por medio de la presión piloto.

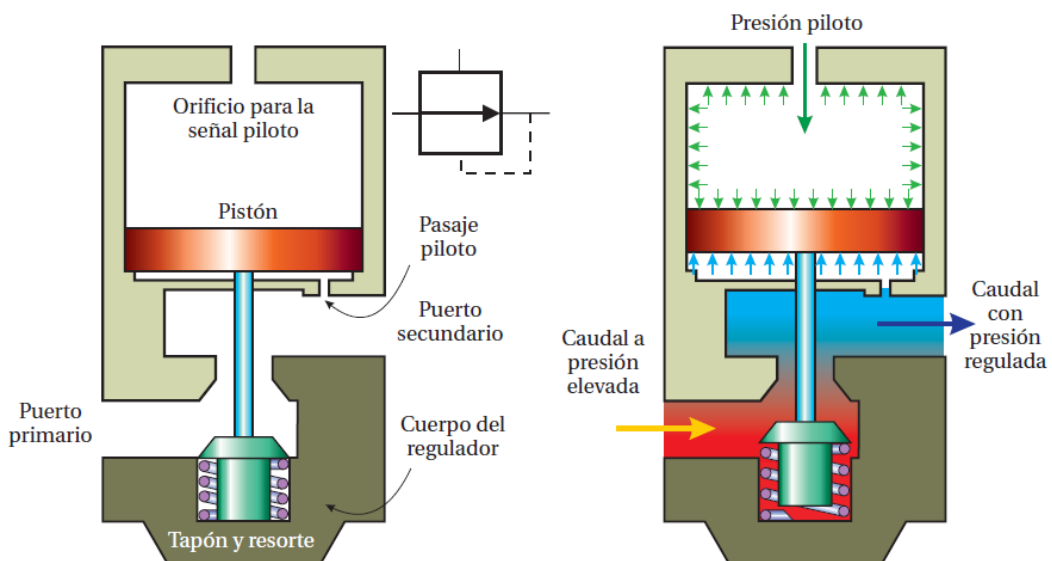


Figura 1.26. Funcionamiento de la válvula reguladora operada por piloto. [10]

1.4.7. Motor Neumático

Los motores neumáticos producen un momento alrededor de un eje debido a la expansión del aire comprimido que les es suministrado. En comparación con los motores eléctricos, pesan menos y tienen menor volumen, desarrollan más potencia en proporción a su tamaño, el momento en el eje aumenta con la carga, no se dañan cuando se bloquean, la cantidad de ciclos de arranque y paro son ilimitados y el control de su velocidad angular es fácilmente manejable mediante una válvula reguladora de caudal mientras que el torque y la potencia se regulan mediante la presión suministrada.

El motor de paletas (figura 1.27.) genera un momento torsor debido al desbalance de presión que actúa sobre la superficie de las paletas. Las paletas se introducen en las ranuras del rotor, el cual está montado excéntricamente dentro del cilindro hueco de la carcasa. La excentricidad genera un volumen en aumento entre cada paleta consecutiva durante una media revolución, permitiendo aspirar el aire suministrado. Posteriormente en la siguiente media revolución, el volumen decrece permitiendo así la expulsión a la atmósfera.

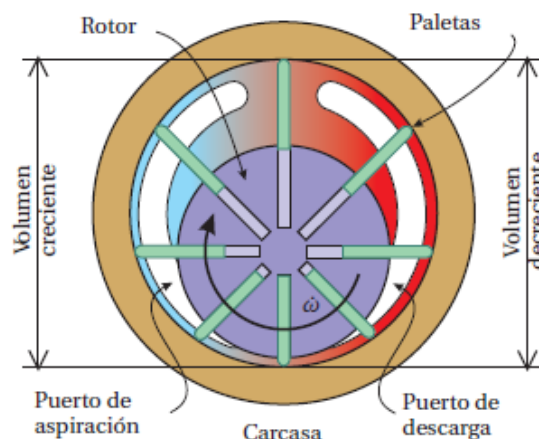


Figura 1.27. Funcionamiento de un motor de paletas. [10]

Este tipo de motores genera elevadas revoluciones (3000 y 80000 rpm) sin carga, por lo que lo habitual es que cuenten con una reducción de engranes incorporada en su propia carcasa. También proporcionan una marcha suave, continua y sin vibraciones, no les afecta el calor ni los ambientes húmedos o corrosivos. Adicionalmente, no requieren de lubricación si el funcionamiento es intermitente y en caso de requerirlo, se recomienda emplear el lubricador de la unidad de mantenimiento.

Las partes del motor de paletas deslizantes son las que indica la figura 1.28. El motor posee una sección de engranajes planetarios, los mismos que permiten transmitir una potencia mayor en espacios reducidos.

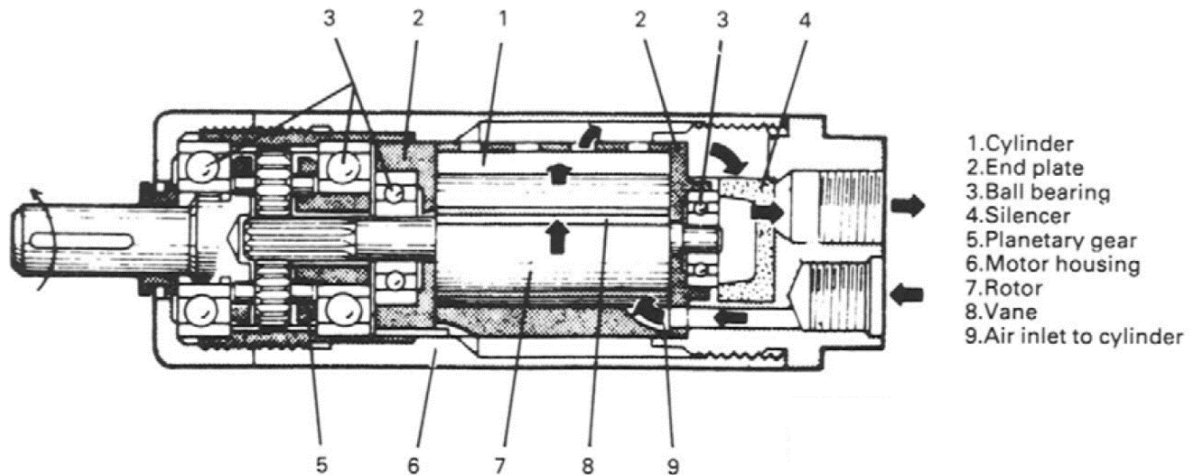


Figura 1.28. Partes de un motor de paletas. [18]

1.5. Sistema de Control

El avance de la tecnología en la última década ha permitido que la mayor parte de dispositivos de uso cotidiano sean controlables mediante la programación lógica, haciéndolos más seguros y fáciles de usar. Actualmente este tipo de tecnología se encuentra al alcance de todos y se aplica en una infinidad de campos. En este contexto, el sistema neumático regenerativo que se montará en la bicicleta, estará provisto de un sistema de control que permitirá aplicar la energía almacenada o, por el contrario, permitirá almacenar la energía producto de la regeneración, de acuerdo a un determinado escenario.

Se abordarán los componentes del sistema de control automático y las plataformas basadas en microcontroladores como complemento del control automático.

1.5.1. Sensor

“Llamado también elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia.” [19]

1.5.2. Actuadores

“El actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia.” [19]

1.5.3. Controlador automático

“Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. Esto puede representarse mediante un diagrama bloques” [19] de acuerdo a la figura 1.29.

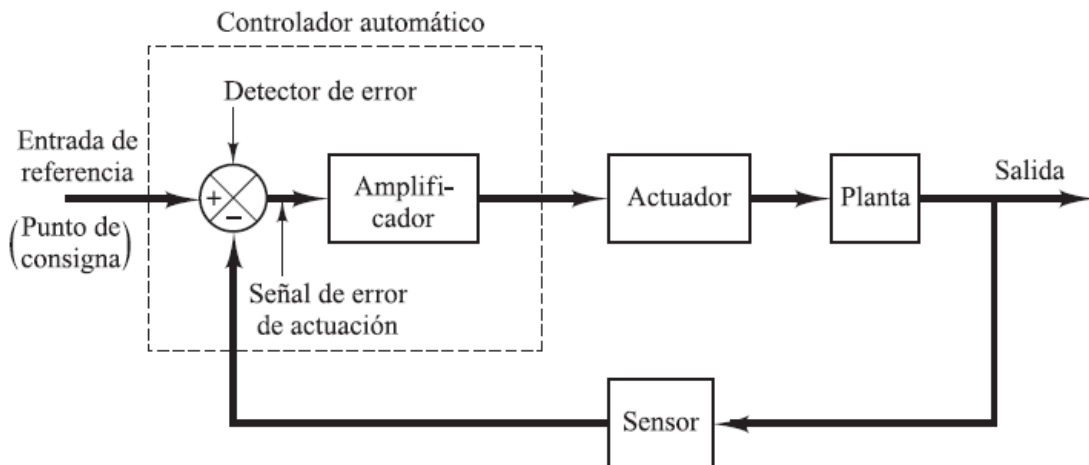


Figura 1.29. Componentes de un sistema de control automático. [19]

La entrada y la salida del sistema forman una relación causa y efecto por lo que el proceso a controlar estará relacionado siempre con éstas. [20]

1.5.4. Plataformas basadas en Microcontroladores

Las plataformas basadas en microcontroladores son de gran utilidad en el campo de la electrónica porque permite reducir los tiempos relacionados con el diseño de un prototipo, además aumenta la confiabilidad del sistema en sí. Son placas que integran partes electrónicas, circuitos, microcontroladores que en conjunto proporcionan capacidades básicas para que los usuarios puedan desarrollar las funciones que requiere en el proyecto. [21]

Existen dos grupos en los que las plataformas se clasifican de acuerdo a su funcionalidad. El primer grupo corresponde a aquellas que permiten la ejecución de proyectos de nivel medio y básico en electrónica. El segundo está representado por aquellas que disponen de procesadores, entradas y salidas dedicadas para audio, video e inclusive conectividad por red, WIFI o Bluetooth para proyectos de alta complejidad.

Para relacionar el trabajo presente con alguno de los dos grupos mencionados anteriormente, se establecen de manera general las entradas y salidas que se requieren.

Las entradas se corresponden con sensores que permitirán conocer determinados valores como la velocidad angular de la rueda posterior, la inclinación de la bicicleta, etc. Por otra parte, las salidas estarán asociadas a la actuación de una válvula neumática y una pantalla para desplegar cierta información. Por lo tanto, todas las entradas como las salidas pueden ser introducidas en una plataforma del primer grupo.

Algunas plataformas para proyectos de nivel medio y básico son Arduino, ChipKIT, Adafruit, LaunchPad, Parallax, etc. La figura 1.30. indica un modelo de placa de la plataforma Arduino.

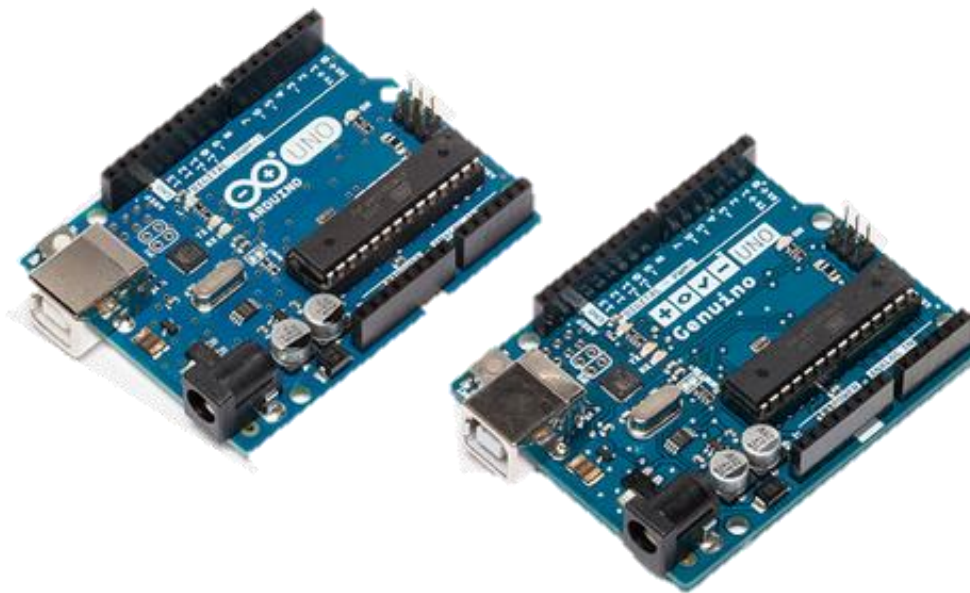


Figura 1.30. Placas Arduino Uno/Genuino Uno. [22]

Estas placas son provistas de pines digitales o analógicos, conexiones para alimentación de energía y transferencia de datos. Se programan mediante un IDE (Integrated Development Environment) o Entorno de Desarrollo Integrado que es una aplicación informática que facilita la programación del microcontrolador y en consecuencia el desarrollo del software para el correcto funcionamiento del sistema de control.

Se alimentan con el voltaje enviado desde el computador por medio del USB (5V) y una vez programado se puede instalar en cualquier lugar, dependiendo del tipo de proyecto, ya sea mediante una fuente de voltaje continuo conectada a la red o mediante una batería. Los valores del voltaje deben estar en especificación y se debe prestar atención a la potencia que consumen en conjunto los sensores, actuadores y la misma tarjeta para poder seleccionar la fuente adecuada.

1.6. Resistencia de Materiales

Se prevé que para transmitir la potencia entre la rueda posterior y el motor neumático será necesaria la adaptación de ciertos elementos para sujeción dado que estarán sometidos a diferentes tipos de esfuerzos.

1.6.1. Esfuerzo

“Es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo, la cual es una función de la carga, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura.” [17]

1.6.2. Esfuerzo normal

Identificado con la letra griega sigma (σ), se considera que si su dirección es saliente de la superficie considerada, es un esfuerzo de tensión y tiene signo positivo. Por otro lado, si su dirección es entrante a la superficie, es un esfuerzo compresivo y expresa una cantidad negativa. [17] La ecuación 1.26. muestra la relación para determinar el esfuerzo normal dada una fuerza y un área de aplicación de la fuerza.

$$\sigma = \frac{F_x}{A} [Pa] \quad (\text{Ec. 1.26.}) [17]$$

donde:

σ : Esfuerzo normal. [Pa]

F_x : Fuerza en sentido normal al área. [N]

A : Área de aplicación de la fuerza. [m²]

1.6.3. Esfuerzo cortante

Identificado con la letra griega tau (τ), tiene su dirección contenida en el plano de la superficie en cuestión. [17] De la misma manera que en el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante queda determinado por la ecuación 1.27.

$$\tau = \frac{F_{yz}}{A} [Pa] \quad (\text{Ec. 1.27.}) [17]$$

Los esfuerzos, tienen unidades de Pascales, siendo muy frecuente utilizados los prefijos GPa, MPa o kPa en el sistema métrico, mientras en el sistema inglés se expresa en unidades de psi y frecuentemente utilizado el prefijo ksi.

La figura 1.31. muestra los esfuerzos mencionados en una superficie dada.

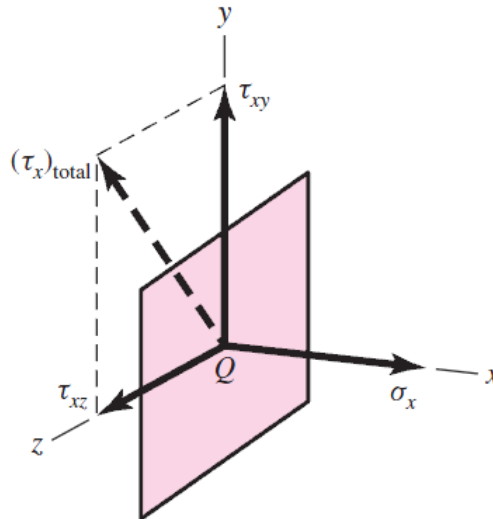


Figura 1.31. Esfuerzo normal y cortante. [17]

1.6.4. Resistencia

“La resistencia es una propiedad de un material o de un elemento mecánico. La resistencia de un elemento depende de la elección, el tratamiento y el procesamiento del material.” [17]

En los materiales dúctiles se puede observar cierto punto característico al graficar el esfuerzo y la deformación de un material sometido a tracción. Este punto se llama punto de fluencia, que indica que el esfuerzo ejercido en el material ha sobrepasado el límite elástico y ha comenzado a ceder. Se le suele conocer como S_y al valor relacionado con la resistencia a la fluencia y S_u a aquel relacionado con la resistencia última que representa el valor máximo que toma el material antes de romperse.

Retomando lo expresado párrafos atrás, algunos elementos serán sometidos a esfuerzos cortantes y por esta razón es necesario saber cómo cuantificar la resistencia de un material cuando es sometido a este tipo de esfuerzos.

De acuerdo a la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles, la relación entre la resistencia a la fluencia y la resistencia a cortante de un material es lo expresado por la ecuación 1.28.

$$S_{sy} = 0,557S_y[Pa] \quad (\text{Ec. 1.28.}) [17]$$

De esta manera queda expresada la resistencia a cortante de un material en función de la resistencia a la fluencia.

1.6.5. Factor de seguridad

El factor de seguridad resulta de la relación entre la resistencia de pérdida de la función y el esfuerzo permisible. La ecuación 1.29. indica el factor de seguridad.

$$n = \frac{S}{\sigma_{perm}} \quad (\text{Ec. 1.29.}) [17]$$

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA NEUMÁTICO CON REGENERACIÓN

En el presente capítulo se desarrollarán los diseños de los tres subsistemas que componen el acoplamiento del sistema neumático con regeneración. Por un lado, se aborda el diseño conceptual y básico del sistema en general, dejando el diseño de detalle para cuestiones específicas de los subsistemas neumático y de transmisión. Posteriormente, el subsistema de control se diseña con la información de los dos subsistemas anteriores, comenzando con el diseño conceptual, básico y de detalle del mismo.

2.1. Diseño conceptual del sistema neumático con regeneración

El sistema neumático con regeneración involucra dos procesos que son complementarios entre sí, no se ven afectados por cualquier otro factor y además se ejecutan uno a la vez.

La figura 2.1. muestra los procesos cíclicos de regeneración y aportación que permitirán el funcionamiento del sistema completo. Se puede observar que, por un lado, la regeneración permitirá aprovechar la energía remanente cuando se tenga un descenso o se desee reducir la velocidad. Por otro lado, la aportación será llevada a cabo cuando se dé la necesidad de ascender o aumentar la rapidez. De esta manera, la energía almacenada en la regeneración se aprovecha en la aportación. Ambos procesos están ligados entre sí debido a que la entrada para el proceso de aportación es la salida del proceso de regeneración y viceversa.



Figura 2.1. Procesos del sistema neumático regenerativo.

(Fuente: Propia)

2.1.1. Requerimientos para el diseño

Entre los requerimientos se encuentran varios aspectos implícitos a los dos procesos antes mencionados y son:

- Diferencia de altura.- Expresa la necesidad de tener descensos o ascensos en el trayecto.
- Variación de la rapidez.- Expresa la necesidad de tener tramos de avance rápido o lento, que dependerán de la ruta y de factores como el sector, tipo de vía, tráfico, etc.
- Límites de la rapidez.- Expresa tanto el límite superior como inferior para poder ejecutar la regeneración y la aportación.
- Distancia y tiempo de regeneración/aportación.- Expresa el espacio y el intervalo de tiempo en que los procesos se ejecutan.

Estos requerimientos pueden lograrse fácilmente en la ciudad de Quito ya que, al estar ubicada entre montañas, tanto calles como avenidas tienen cierto nivel de inclinación. Adicionalmente, todos los trayectos involucran la variación de la rapidez y se pueden tener descensos y ascensos largos que permitirían regenerar o aportar. Finalmente, se tienen valores definidos para velocidades máximas y mínimas.

Con los requerimientos identificados, se procede a abordar cada uno de ellos con el fin de definirlos de manera amplia y de esta manera delimitar los parámetros de diseño del sistema neumático.

2.1.2. Diferencias de altura

La diferencia de altura es el requerimiento más importante para el sistema. La energía que se almacenará en el reservorio corresponde a aquella que el compresor puede introducir debido al proceso de regeneración que se ejecuta para reducir la rapidez del usuario.

Para tener una idea aproximada de las diferencias de altura que se pueden tener en la ciudad, se muestra la figura 2.2. en la que se aprecian las curvas de nivel. Éstas indican las alturas de los diferentes sectores mediante líneas que representan una misma elevación.

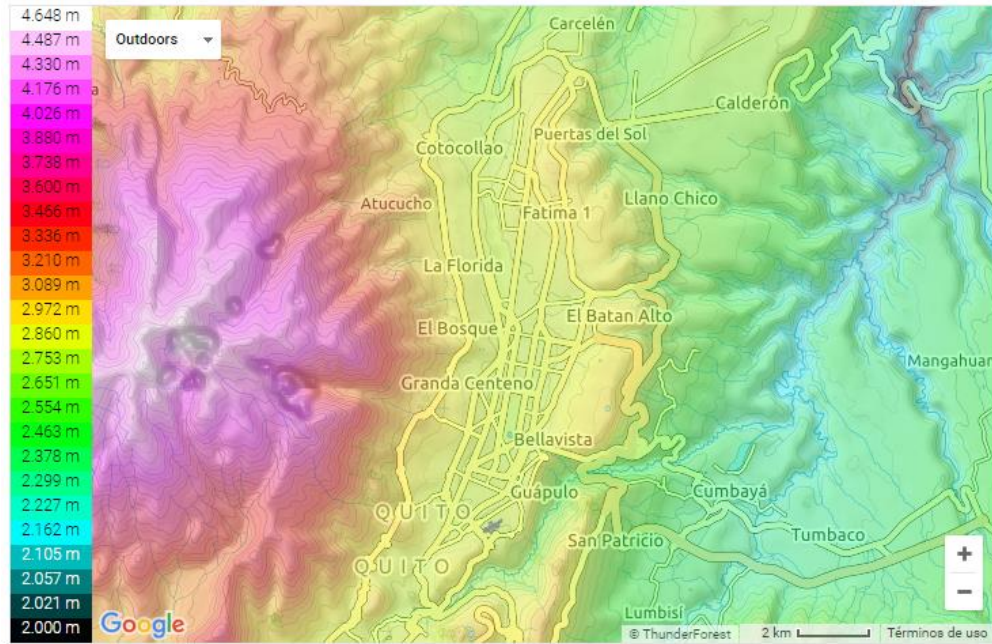


Figura 2.2. Curvas de nivel de la ciudad de Quito. [23]

2.1.3. Variación de la rapidez

Este requerimiento se encuentra intrínsecamente relacionado con cualquier trayecto dentro de una ciudad. Al recorrer un trayecto, éste siempre tendrá varios factores que modifican la rapidez como pueden ser: la presencia de semáforos, cruce de peatones, tráfico vehicular, negligencia de autos y peatones, etc. Estos factores generarán intervalos de tiempo en los que el usuario requiera frenar o acelerar a voluntad y en estos casos, el sistema neumático podrá estar habilitado para dichos intervalos.

La figura 2.3. muestra un gráfico que se obtuvo mediante la aplicación Samsung Health desde un teléfono celular al realizar un recorrido en bicicleta desde la Av. Seis de Diciembre y Leonardo Murialdo hasta la Av. Coruña y Orellana. Los datos se recopilan mediante GPS y la aplicación obtiene varios datos como: velocidad máxima, velocidad mínima, velocidad promedio, distancia recorrida, elevación, tiempo transcurrido, calorías quemadas, etc. El gráfico muestra una línea azul que representa la velocidad instantánea en función del tiempo, permitiendo visualizar que en el trayecto existen crestas y valles alternados. Esa forma sinusoidal de la gráfica implica que a medida que pasa el tiempo, el usuario tiene la necesidad de acelerar y posteriormente frenar, cumpliéndose ciclos que pueden asociarse a los procesos de regeneración y aportación.

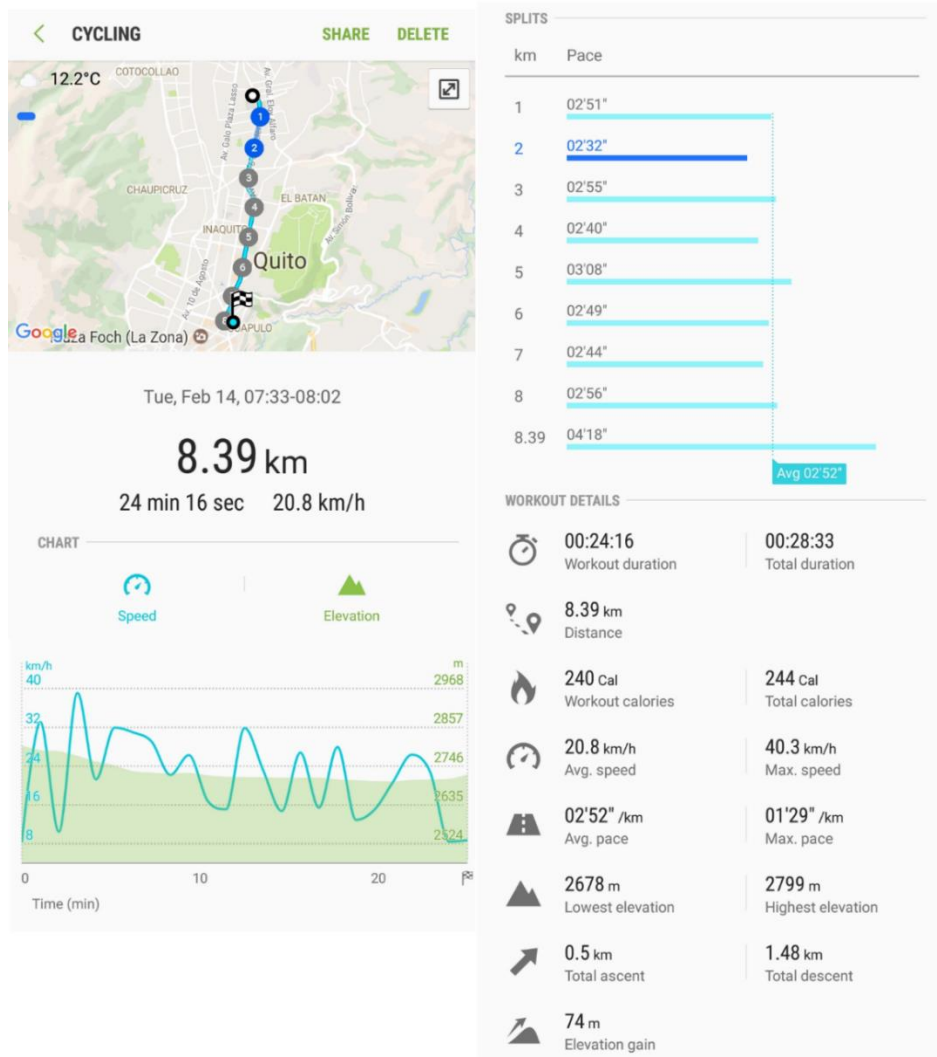


Figura 2.3. Reporte del recorrido (Salida).

(Fuente: Propia)

De la misma manera, se realizó el recorrido de manera inversa para poder visualizar los ciclos de aceleración y desaceleración del mismo trayecto. Un análisis breve muestra que en el trayecto de regreso se aprecian más picos y valles. Se podría intuir que una de las razones para que sucediera esto, es el tráfico habitual a las 18h00 y también el hecho de que el retorno por la misma ruta implica una constante subida en tramos con pendientes casi insignificantes y en otros con unas más pronunciadas.

Estas crestas y valles observados tanto en la figura 2.3. como 2.4., confirman que existe un potencial de regeneración y aportación debido a la analogía entre los procesos antes mencionados y las particularidades de los trayectos realizados en la ciudad. El Anexo I está conformado por otros 34 viajes que sirven como justificación para establecer que la variación de la rapidez es un requerimiento más del sistema neumático.

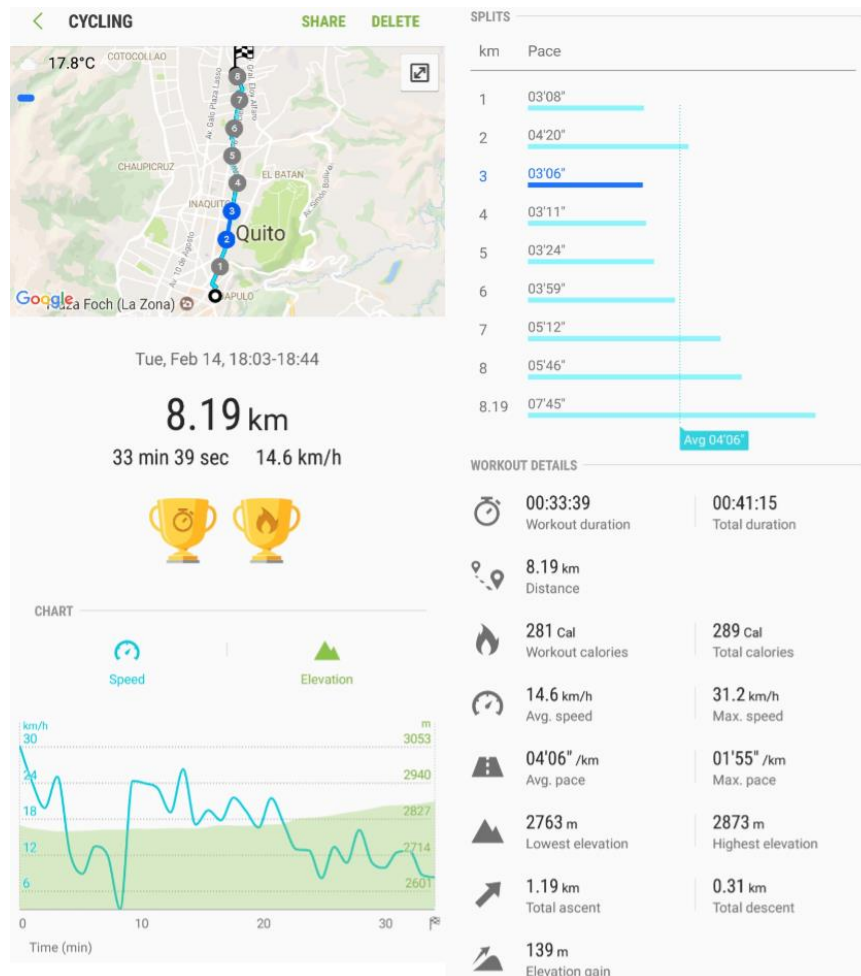


Figura 2.4. Reporte del recorrido (Regreso).

(Fuente: Propia)

2.1.4. Límites de la rapidez

Establecer un límite para la rapidez en ambos procesos es una tarea que requiere de un análisis energético en el que se vean reflejadas las variables involucradas en el diagrama de cuerpo libre obtenido en el primer capítulo. El análisis energético forma parte del diseño básico, mismo que se abordará en el subcapítulo 2.2.

Es importante aclarar que este requerimiento está ligado a la eficiencia energética y, por lo tanto, implica que el usuario debe conocer plenamente que se debe tener un criterio de manejo eficiente. En este sentido, el usuario de la bicicleta con el sistema neumático regenerativo tendrá en cuenta que, para descender durante un trayecto, lo más eficiente es permitir que el sistema regenere sin acelerar o frenar bruscamente a menos que sea necesario. De la misma manera, en el proceso de aportación, un ascenso óptimo será aquel

en el que el usuario contribuye con una parte de la potencia total requerida para el ascenso y el sistema neumático regenerativo con el resto, ya que éste no está diseñado para sustentar el 100% de la potencia en la subida. Se puede estimar que el sistema pueda aportar con un 50% de la potencia para los ascensos teniendo como referencia este valor para las bicicletas eléctricas no autónomas.

Para tener una idea aproximada de los límites de rapidez del sistema a diseñar, se tomarán como referencia los valores típicos de un viaje en ciudad [8]. La rapidez promedio está entre 12 y 15 km/h o 3.33 y 4.17 m/s. La velocidad máxima puede fácilmente duplicar estos valores, es decir entre 25 y 30 km/h o 6.94 y 8.33 m/s, sobre todo en descensos de pendiente considerable. La velocidad mínima dependerá del lugar por donde el usuario se encuentre circulando (ciclovía, vereda en donde sea permitido o vía) y del escenario que tenga en frente (ascensos, tráfico u obstáculos). Con estos datos, en el caso del sistema neumático regenerativo, la velocidad máxima al aplicar la regeneración será algo menor que la máxima del valor referencial debido a que la regeneración implica una disminución de velocidad.

2.1.5. Distancia y tiempo de regeneración/aportación

Este requerimiento influye en la energía que el sistema neumático va a poder regenerar o aportar. Esto quiere decir que mientras más distancia y más tiempo dure la regeneración, mayor es la cantidad de energía que se puede obtener. De manera análoga, mientras más energía se pueda tener acumulada en el reservorio, mayor será la distancia y el tiempo que se puede ejercer el proceso de aportación. Este requerimiento formará parte del análisis energético planteado en la ingeniería básica.

2.2. Diseño básico del sistema neumático con regeneración

Para plantear el diseño básico, es necesario conocer de qué se trata cada uno de los procesos involucrados en el proyecto. Con los procesos descritos, se logrará tener una idea clara de los componentes o elementos necesarios. De esta manera, al conocer los componentes de los procesos, éstos podrán ser consolidados para tener un sistema neumático general.

2.2.1. Regeneración

La descripción del proceso es la siguiente:

- La rueda posterior gira debido a un descenso.
- Una cadena transmite la potencia que se tiene entre la catarina de la rueda que gira y la catarina del motor neumático.
- El eje del motor neumático gira debido a la potencia transmitida por la cadena.
- El motor neumático admite y expulsa aire por sus cámaras.
- El aire expulsado pasa a almacenarse a un reservorio.

La figura 2.5. muestra un diagrama básico del proceso de regeneración.

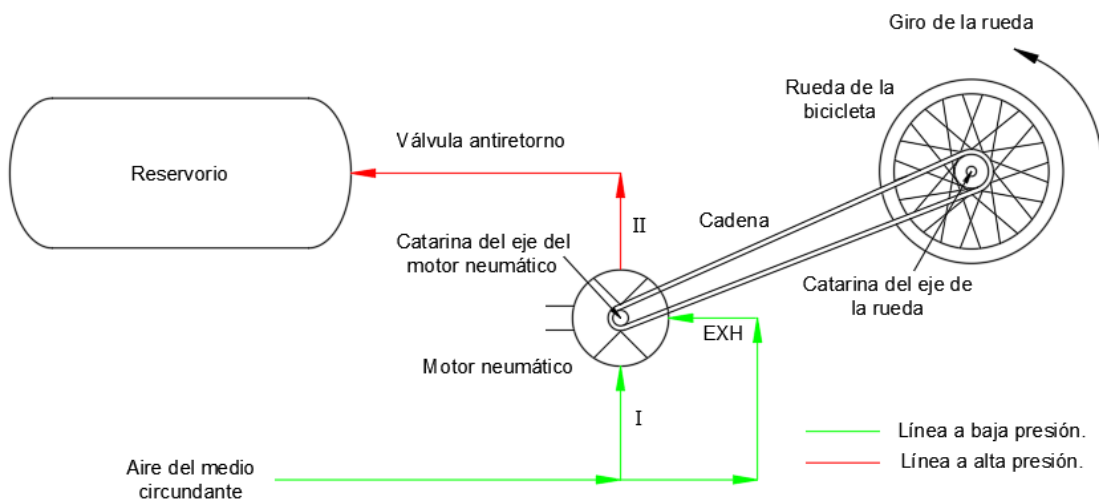


Figura 2.5. Diagrama básico del proceso de regeneración.

(Fuente: Propia)

2.2.2. Aportación

El proceso de aportación se describe a continuación:

- El aire comprimido en el reservorio es dirigido hacia el puerto del motor neumático.
- El aire ingresa al motor neumático y el eje de éste gira.
- La catarina del eje del motor neumático gira.

- La potencia se transmite a la rueda por medio de una cadena.

Un diagrama básico del proceso se muestra en la figura 2.6.

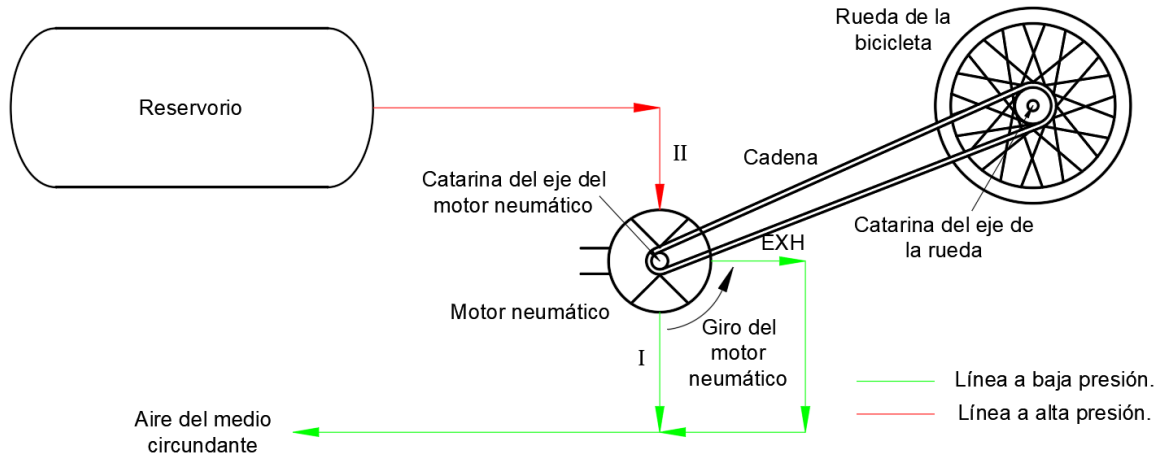


Figura 2.6. Diagrama básico del proceso de aportación.

(Fuente: Propia)

2.2.3. Consolidación de los procesos de regeneración y aportación

Los dos procesos deben estar consolidados en un solo sistema, que permita reducir al máximo el espacio y peso agregados a la bicicleta convencional. Por lo tanto, este sistema estará conformado por el sistema de transmisión y neumático. Los componentes de estos sistemas servirán para ejecutar cualquiera de los dos procesos, uno a la vez, dependiendo de las condiciones de la ruta.

El gráfico de la figura 2.7. muestra los componentes de los que estará compuesto el sistema a nivel general. Sin embargo, en el subcapítulo 2.3. se indicará a nivel de detalle, todos y cada uno de los componentes del sistema.

Se puede notar que para la consolidación de los procesos ha sido necesario introducir válvulas de control direccional y antirretorno. Estas válvulas permitirán que el fluido entrante o saliente del sistema viaje por las mangueras de tal manera que se cumpla la ejecución de uno u otro proceso dependiendo de la necesidad del usuario.

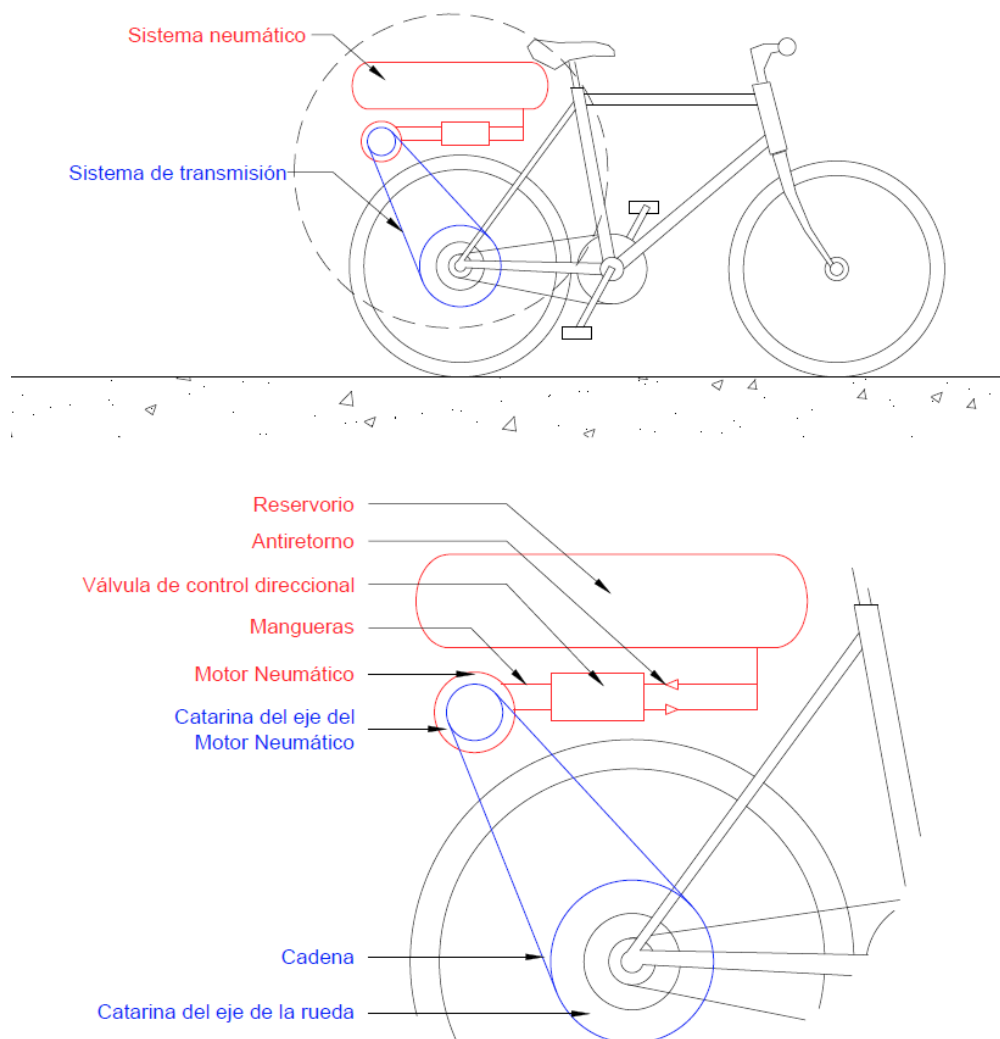


Figura 2.7. Procesos consolidados en los sistemas de transmisión y neumáticos.

(Fuente: Propia)

2.2.4. Análisis energético para el proceso de regeneración

El análisis energético consiste en formar una hoja de cálculo que permitirá conocer las potencias generadas en el descenso al modificar algunas variables tales como la velocidad, el ángulo de inclinación del descenso, la distancia y tiempo. Con estos datos se podrá estimar la potencia de regeneración y los valores más críticos para el sistema.

Para que el proceso de regeneración pueda ocurrir, el usuario debe ganar cierta rapidez en un descenso. La figura 2.8. muestra una gráfica de velocidad vs tiempo en la que se puede apreciar el proceso completo de regeneración de acuerdo a los intervalos de tiempo en los que suceden. La descripción es la siguiente:

- El intervalo 0-1 corresponde a la ganancia de velocidad que el usuario adquiere al descender.

- El intervalo 1-2 corresponde a una desaceleración que, para fines del análisis, será tomada como desaceleración constante.
- El intervalo 2-3 es la última parte de la regeneración y representa una rapidez constante.

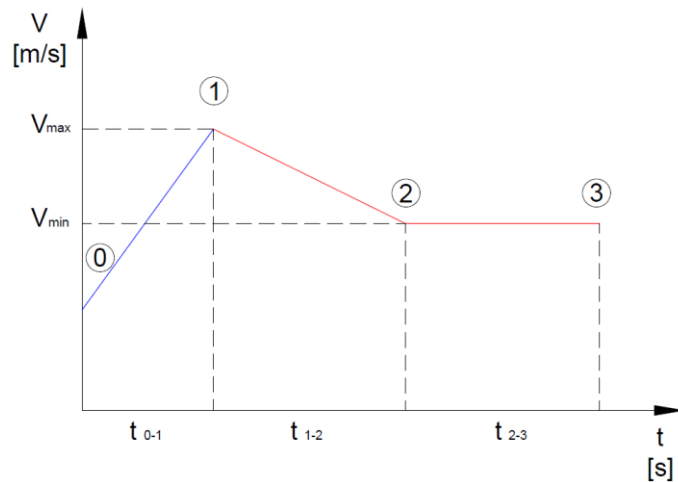


Figura 2.8. Gráfica velocidad vs. tiempo para el proceso de regeneración.

(Fuente: Propia)

La figura 2.9. representa la altimetría tomada para el análisis energético del proceso de regeneración. Se puede ver el ángulo de inclinación del descenso (θ), la distancia total recorrida (d_T) y las dos partes que la conforman (d_{1-2} , d_{2-3}).

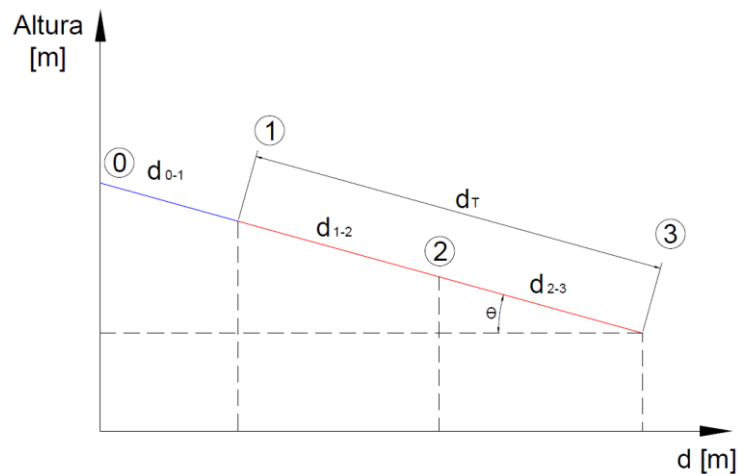


Figura 2.9. Gráfica Altura vs. Distancia para el proceso de regeneración.

(Fuente: Propia)

Con las ecuaciones estudiadas en el subcapítulo 1.3. se procede a armar una hoja de cálculo que permita encontrar la potencia que se obtendrá de la regeneración entre los

intervalos 1-2 y 2-3 de acuerdo a la figura 2.7 y 2.8. Para esto, se deben definir las siguientes variables mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Variables definidas para la regeneración.

Variable	Valor
V ₁ (km/h m/s)	30,00 8,33
V ₂ (km/h m/s)	25,00 6,94
V ₃ (km/h m/s)	25,00 6,94
t ₁₋₂ (s)	10,00
M _T (kg)	100,00

(Fuente: Propia)

La tabla 2.2. expresa los cálculos que se fueron realizando para las ecuaciones 1.15., 1.16., 1.23. En la primera columna se muestra la variación del ángulo de inclinación para el proceso de regeneración. Las dos últimas columnas representan las potencias encontradas para el intervalo de regeneración en el sector 1-2 y 2-3 respectivamente. Estas potencias son las que se generarían en el eje de la rueda si se cumplen los valores de la tabla 2.1. Por otro lado, los valores negativos expresan que la potencia en el eje de la rueda no es suficiente (celdas de color naranja) para cumplir las condiciones antes indicadas.

Tabla 2.2. Potencia de regeneración al variar el ángulo de inclinación.

θ	F _{RP1-2} (N)	F _{RP2-3} (N)	Tq ₁₋₂ (N.m)	Tq ₂₋₃ (N.m)	W ₁₋₂ (W)	W ₂₋₃ (W)
0,00	-8,38	-16,68	-2,77	-5,51	-63,98	-115,86
0,50	0,19	-8,12	0,06	-2,68	1,42	-56,41
1,00	8,75	0,44	2,89	0,14	66,81	3,04
1,50	17,30	9,00	5,71	2,97	132,19	62,47
2,00	25,86	17,55	8,54	5,80	197,55	121,90
2,50	34,42	26,11	11,36	8,62	262,90	181,30
3,00	42,97	34,66	14,19	11,44	328,22	240,68
3,50	51,51	43,21	17,01	14,27	393,51	300,04

4,00	60,06	51,75	19,83	17,09	458,76	359,36
4,50	68,59	60,29	22,65	19,91	523,98	418,65
5,00	77,12	68,82	25,47	22,72	589,15	477,89
5,50	85,65	77,34	28,28	25,54	654,27	537,09
6,00	94,17	85,86	31,09	28,35	719,33	596,24
6,50	102,68	94,37	33,90	31,16	784,34	655,34
7,00	111,18	102,87	36,71	33,97	849,28	714,38
7,50	119,67	111,36	39,52	36,77	914,15	773,35
8,00	128,15	119,85	42,32	39,57	978,95	832,26
8,50	136,63	128,32	45,11	42,37	1043,67	891,10
9,00	145,09	136,78	47,91	45,16	1108,31	949,85
9,50	153,54	145,23	50,70	47,95	1172,85	1008,53
10,00	161,97	153,67	53,48	50,74	1237,30	1067,12
10,50	170,40	162,09	56,27	53,52	1301,65	1125,62
11,00	178,81	170,50	59,04	56,30	1365,90	1184,03
11,50	187,20	178,90	61,82	59,07	1430,04	1242,34
12,00	195,59	187,28	64,58	61,84	1494,06	1300,54
12,50	203,95	195,64	67,35	64,60	1557,97	1358,64
13,00	212,30	203,99	70,10	67,36	1621,75	1416,62
13,50	220,63	212,33	72,85	70,11	1685,41	1474,49
14,00	228,95	220,64	75,60	72,86	1748,93	1532,24
14,50	237,25	228,94	78,34	75,60	1812,31	1589,86
15,00	245,53	237,22	81,07	78,33	1875,55	1647,35
15,50	253,79	245,48	83,80	81,06	1938,64	1704,71
16,00	262,03	253,72	86,52	83,78	2001,58	1761,92
16,50	270,24	261,94	89,23	86,49	2064,36	1819,00
17,00	278,44	270,13	91,94	89,20	2126,98	1875,93
17,50	286,62	278,31	94,64	91,90	2189,44	1932,70
18,00	294,77	286,46	97,33	94,59	2251,72	1989,32
18,50	302,90	294,59	100,02	97,27	2313,83	2045,78
19,00	311,01	302,70	102,69	99,95	2375,75	2102,08
19,50	319,09	310,78	105,36	102,62	2437,49	2158,20
20,00	327,15	318,84	108,02	105,28	2499,04	2214,16

(Fuente: Propia)

La figura 2.10. muestra la variación de la potencia debido a la variación del ángulo. Se puede notar que para el intervalo 1-2, desde una medida de 1.5 grados de inclinación, la potencia en el sector de desaceleración es mayor a la potencia en el sector 2-3 de velocidad constante.

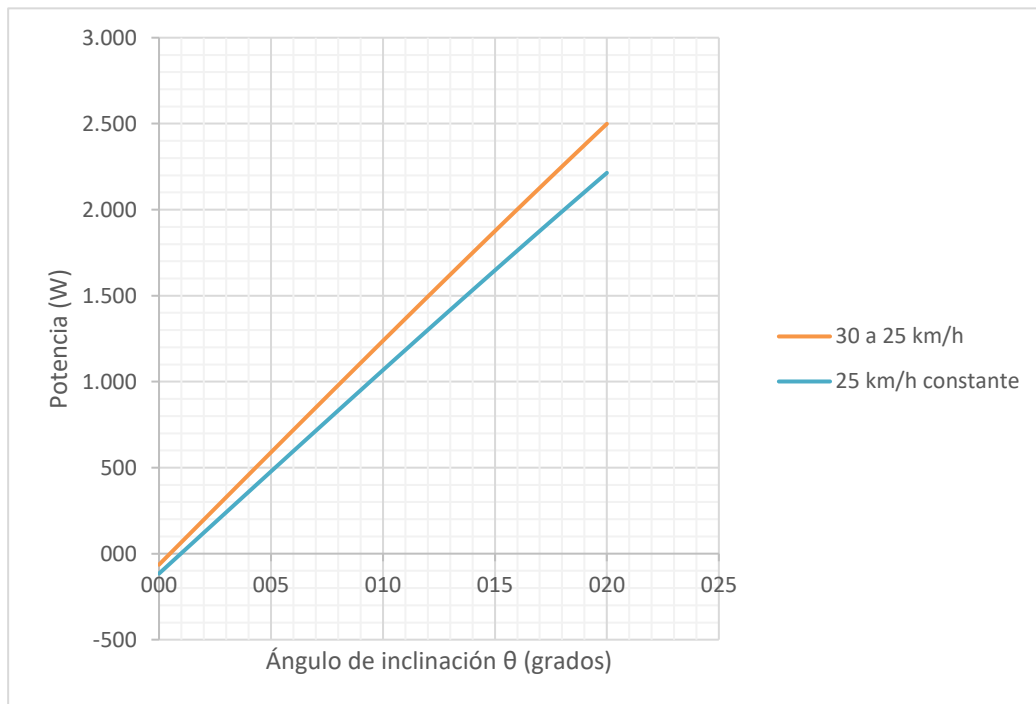


Figura 2.10. Gráfica Potencia vs. ángulo de inclinación para el proceso de regeneración.

(Fuente: Propia)

La figura 2.11. muestra las variaciones de la potencia con ángulo de inclinación para el sector 1-2 en el caso de regenerar desde 30 hasta 25 km/h, otra desde 30 hasta 20 km/h y finalmente desde 30 hasta 15km/h. Esta figura revela que las variaciones de potencia son mínimas, para cada uno de los casos de velocidad final expresados anteriormente. Por lo tanto, la desaceleración desde una misma velocidad inicial hasta otras velocidades inferiores, no tiene mayor incidencia en la variación de potencia de un caso respecto de otro.

Por otra parte, la figura 2.12. muestra las variaciones para el sector 2-3 en el caso de regenerar a 25, 20 y 15 km/h de manera constante. A diferencia de la figura 2.10., se puede notar claramente que la gráfica de la figura 2.11. se caracteriza por tener una potencia prácticamente coincidente a bajos ángulos de inclinación que, a medida que se incrementa, las potencias se van distanciando para cada caso.

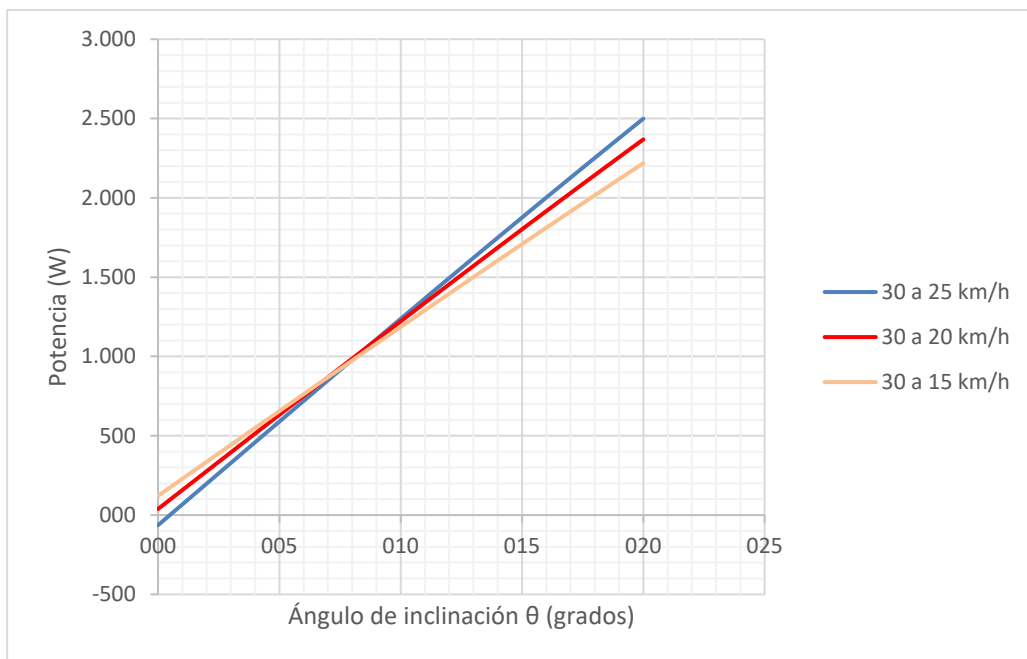


Figura 2.11. Gráfica Potencia vs. ángulo de inclinación, 3 casos sector 1-2.

(Fuente: Propia)

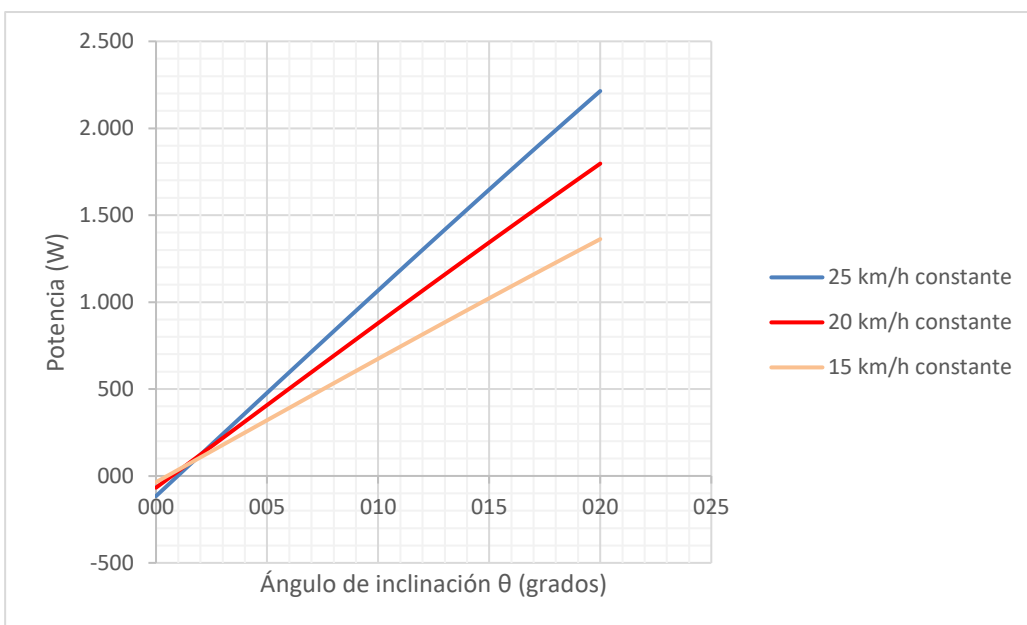


Figura 2.12. Gráfica Potencia vs. ángulo de inclinación, 3 casos sector 2-3.

(Fuente: Propia)

Estas gráficas permiten visualizar los valores de la potencia generada si el proceso de regeneración se ejecutara bajo las condiciones de rapidez antes mencionadas. Los datos para la obtención de las figuras 2.10. y 2.11. se encuentran tabulados en el Anexo II.

En conclusión, el análisis energético realizado permite conocer las potencias máximas y mínimas de acuerdo al ángulo de inclinación del descenso. Esta información servirá para dimensionar el sistema neumático de acuerdo al diseño conceptual y básico que se plantearon en su momento. En el subcapítulo 2.3. y en el capítulo 4, se complementará la teoría con los resultados para de esta manera validar el análisis energético elaborado.

2.2.5. Análisis energético para el proceso de aportación

De la misma manera en la que se obtuvieron los datos para el análisis energético en el proceso de regeneración, los datos para el presente análisis se alcanzan mediante el estudio realizado en el subcapítulo 1.3 para la aportación.

Durante un ascenso, el usuario comienza con una rapidez mayor a la que termina, debido al gasto energético de su cuerpo. Sin embargo, al estar provisto del sistema regenerativo, se esperaría que al menos logre subir a velocidad constante y con menor gasto energético de su cuerpo. La figura 2.13. muestra un gráfico de velocidad vs tiempo, siendo el sector 1-2 el de interés.

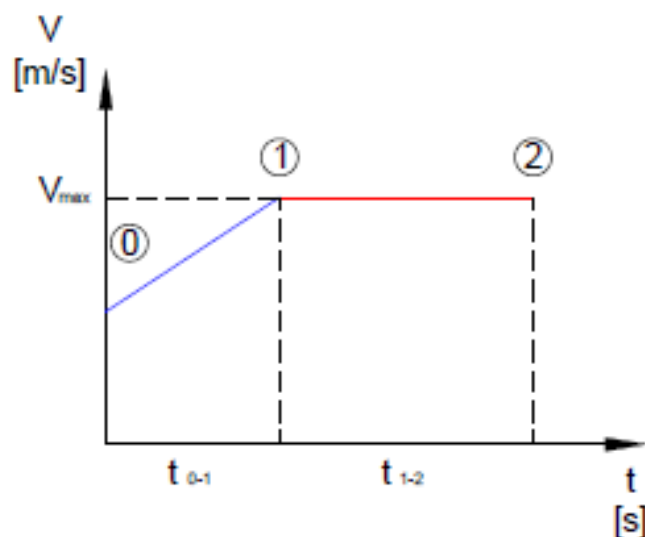


Figura 2.13. Gráfica velocidad vs. tiempo para el proceso de aportación.

(Fuente: Propia)

Consecuentemente la altimetría para este proceso sería la que se muestra en la figura 2.14. De la misma manera que en el análisis energético anterior, el ascenso estará caracterizado por un ángulo de inclinación. En base a la experiencia, se sabe que a medida que el ángulo de inclinación incrementa, se requiere de más esfuerzo para ascender. Esto significa que la potencia necesaria para subir se incrementa con el ángulo de inclinación.

Es importante mencionar que el sector 0-1 no tiene incidencia alguna sobre los resultados debido a que no existe una velocidad estandarizada para un ascenso. Cada usuario asciende con su respectiva bicicleta conforme pueda entregar más o menos potencia con sus piernas. Debe quedar claro que el escenario en donde la aportación se ejecuta a velocidad constante es aquel en el que la potencia entregada por el sistema regenerativo neumático compense el gasto energético del usuario.

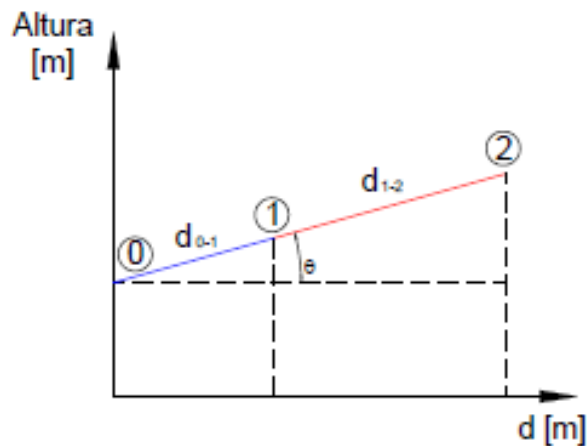


Figura 2.14. Gráfica Altura vs. Distancia para el proceso de aportación.

(Fuente: Propia)

Para continuar con el análisis energético se requiere establecer los valores de las variables de entrada. Estos valores se muestran en la tabla 2.3. y son introducidos en las ecuaciones del subcapítulo 1.3.

Tabla 2.3. Variables definidas para la aportación.

Variable	Valor
V_1 (km/h m/s)	12,00 2,78
V_2 (km/h m/s)	12,00 2,78
M_T (kg)	100,00

(Fuente: Propia)

De esta manera se conforma la tabla 2.4. en la que se puede apreciar la potencia requerida para el ascenso a medida que el ángulo de inclinación varía.

Tabla 2.4. Variables definidas para la regeneración.

θ	FRP1-2 (N)	Tq1-2 (N.m)	W1-2 (W)
0,00	6,92	2,29	23,07
0,50	15,48	5,11	51,61
1,00	24,04	7,94	80,14
1,50	32,60	10,77	108,67
2,00	41,16	13,59	137,20
2,50	49,71	16,42	165,71
3,00	58,26	19,24	194,21
3,50	66,81	22,06	222,70
4,00	75,35	24,88	251,18
4,50	83,89	27,70	279,64
5,00	92,42	30,52	308,07
5,50	100,95	33,33	336,49
6,00	109,46	36,15	364,88
6,50	117,97	38,96	393,25
7,00	126,48	41,76	421,59
7,50	134,97	44,57	449,89
8,00	143,45	47,37	478,17
8,50	151,92	50,17	506,41
9,00	160,38	52,96	534,61
9,50	168,83	55,75	562,78
10,00	177,27	58,53	590,90
10,50	185,70	61,32	618,98
11,00	194,11	64,09	647,02
11,50	202,50	66,87	675,01
12,00	210,88	69,63	702,95
12,50	219,25	72,40	730,83
13,00	227,60	75,15	758,66
13,50	235,93	77,90	786,44
14,00	244,25	80,65	814,16
14,50	252,55	83,39	841,82
15,00	260,82	86,12	869,41
15,50	269,08	88,85	896,94

16,00	277,32	91,57	924,41
16,50	285,54	94,29	951,80
17,00	293,74	96,99	979,13
17,50	301,91	99,69	1006,38
18,00	310,07	102,38	1033,56
18,50	318,20	105,07	1060,66
19,00	326,30	107,75	1087,68
19,50	334,39	110,41	1114,62
20,00	342,44	113,08	1141,48

(Fuente: Propia)

A continuación se indica la figura 2.15. en la que se visualiza la gráfica de la potencia vs el ángulo de inclinación del ascenso. La gráfica se forma a partir de un conjunto de datos generados por diferentes velocidades (10 y 8 km/h), que se asumen constantes en el sector 1-2. Estos datos se encuentran tabulados en el Anexo II.

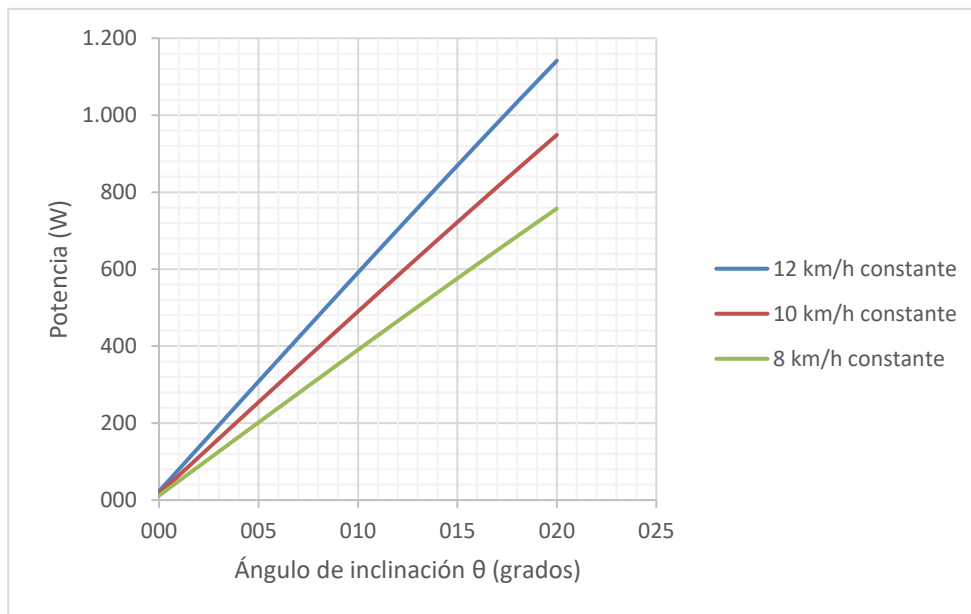


Figura 2.15. Gráfica Potencia vs. ángulo de inclinación para el proceso de aportación.

(Fuente: Propia)

Se puede observar que la potencia requerida es mayor si se desea ascender a una velocidad mayor para un mismo ángulo de inclinación.

2.3. Diseño de detalle del sistema neumático

El diseño de detalle del sistema neumático consiste en definir todas y cada una de las partes del sistema. Se deben tomar en cuenta las bases del diseño conceptual, que se expresaron en el subcapítulo 2.1. así como la descripción de los procesos del subcapítulo 2.2.

2.3.1. Características de la bicicleta

Retomando los conceptos expresados en el subcapítulo 1.1., en el que se definen las partes de una bicicleta urbana y que también aclara que pueden existir variaciones de tipo estructural, se procede a detallar la bicicleta que será empleada para el desarrollo del presente proyecto de titulación con el fin de identificar las características específicas de la misma. La tabla 2.5. muestra dichas características tales como peso, marca de los distintos componentes, dimensiones, etc.

Tabla 2.5. Características de la bicicleta.

Característica	Descripción
Marca	Caloi
Masa Total (kg)	16
Material Cuadro	Aluminio
Material del Manubrio y Stem	Acero
Aros	Rin 26 in Aluminio
Marchas delanteras / Marca Descarrilador	3 / Shimano Altus
Marchas posteriores / Marca Descarrilador	7 / Shimano Tourney
Llantas	Platinum para asfalto 26 in x 2 in
Suspensión / Marca	Delantera / RST

(Fuente: Propia)

2.3.2. Diseño del sistema neumático

El diseño del sistema neumático debe ser conformado de tal manera que mediante el accionamiento de una o más válvulas, se tenga la posibilidad de efectuar la regeneración, la aportación o ninguna de las dos. Para esto, se tomarán los diagramas básicos del sistema de regeneración y del sistema de aportación como base para la realización del diagrama neumático mediante la consolidación de los dos procesos requeridos.

2.3.3. Proceso de regeneración

La figura 2.16. indica el diagrama neumático que permitirá efectuar la regeneración. El proceso es el siguiente:

- En la parte inferior se muestran dos símbolos unidos que representan un filtro (A) y un lubricador (B). El aire del medio circundante a la bicicleta ingresa por el filtro y una vez limpio pasa por el lubricador en el que pequeñas gotas de aceite se incorporan para lubricar el motor neumático.
- Se puede ver que el aire ingresa por dos lugares. El primero pasa por los puertos 1 y 2 de la electroválvula biestable 5/2 (D) y se dirige hacia el puerto de admisión del motor neumático (C) cuando éste gira en el sentido indicado. El segundo lugar por donde el aire ingresa al motor neumático es un puerto empleado como descarga cuando el motor funciona como bidireccional, pero en este caso, funciona como otro puerto de admisión ya que el aire del primer puerto de admisión se encuentra a la misma presión (la atmosférica).
- Las paletas del motor comienzan a comprimir el aire que ingresó por los puertos antes mencionados y a continuación envía el aire comprimido por los puertos 4 y 3 de la electroválvula (D) y pasa al reservorio (G).
- En el reservorio, el aire queda almacenado y protegido por una válvula de alivio (F), que será seteada a 1,1 veces la presión máxima de trabajo del sistema neumático.

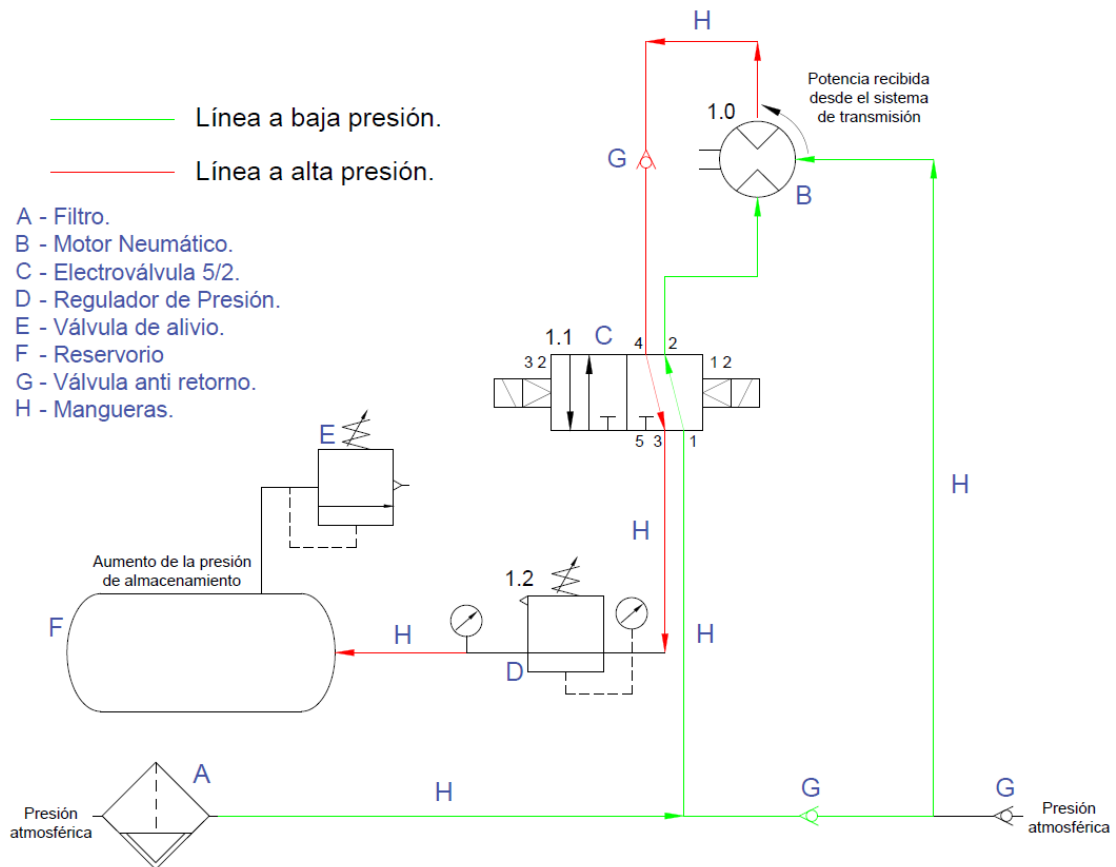


Figura 2.16. Diagrama del sistema neumático para la regeneración.

(Fuente: Propia)

2.3.4. Proceso de aporte

El proceso de aporte de energía por parte del sistema neumático se puede ver en la figura 2.17. y es el siguiente:

- El aire comprimido que se almacenó en el reservorio (G) sale y pasa por un regulador de presión (E) que permite tener la presión deseada aguas abajo del mismo.
- Luego, el fluido pasa por los puertos 3 y 2 de la electroválvula (D) para de esta manera enviar el fluido hacia el puerto de succión del motor neumático (C).
- El motor gira en el sentido indicado y expulsa el aire a presión atmosférica por dos puertos, uno de escape directo a través de la válvula anti retorno (I) y el otro, que es empleado para que el motor funcione en sentido bidireccional mas, en este caso no aplica y únicamente sirve para descargar un remanente de aire pasando por los puertos 4 y 5 de la electroválvula (D).

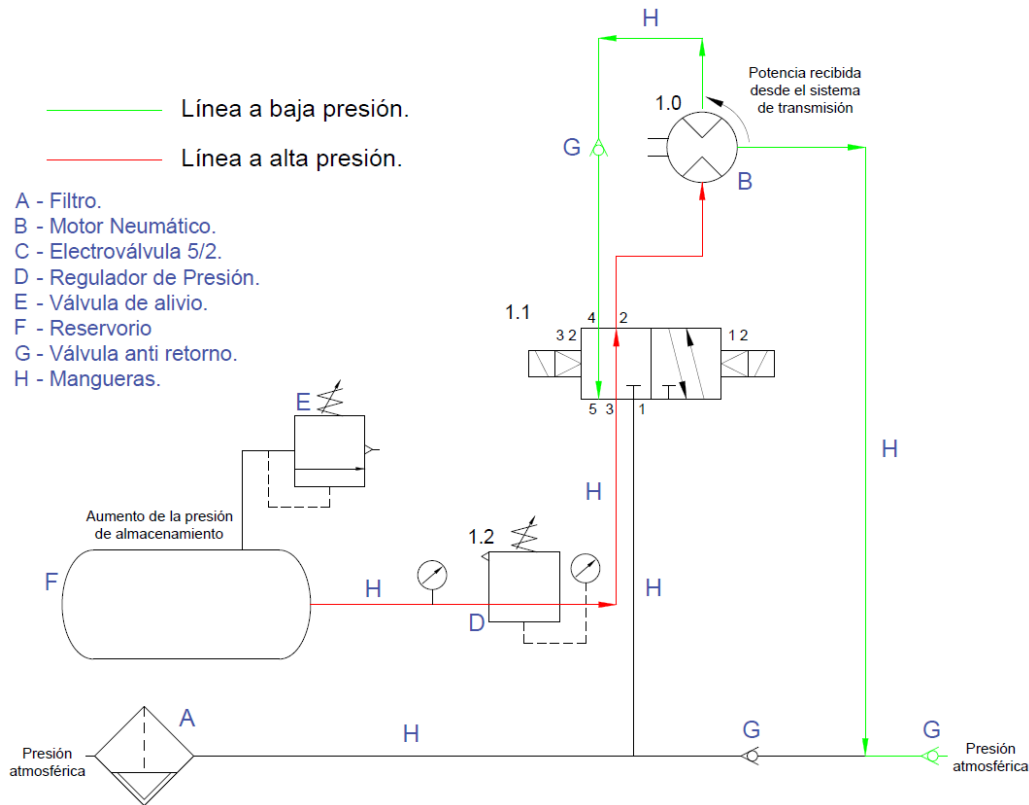


Figura 2.17. Diagrama del sistema neumático para la aportación.

(Fuente: Propia)

El Anexo III incluye un conjunto de símbolos que frecuentemente se emplean en los diagramas neumáticos. En él se encontrarán aquellos símbolos empleados en los diagramas de las figuras 2.16. y 2.17.

2.3.5. Criterio para el dimensionamiento del sistema neumático regenerativo

De acuerdo a los análisis energéticos realizados para los procesos de regeneración y aportación, se puede notar que existe una gran cantidad de energía relacionada con los descensos (fase de regeneración). Esta energía será útil siempre que el sistema pueda emplearla en los ascensos (fase de aportación). Debido a que en la fase de regeneración el usuario no introduce energía, la fase de aportación es la que definirá la potencia para la que se deberá dimensionar el sistema neumático regenerativo.

Retomando lo expresado en el diseño conceptual, el dimensionamiento se realizará para que el sistema sea capaz de aportar con el 50% de la potencia total requerida para un ascenso a una rapidez promedio de 12 km/h hasta ángulos de inclinación de 10°. A continuación se señalan los criterios para el dimensionamiento de los elementos del sistema neumático y de transmisión respectivamente.

Finalmente, con estos criterios se procede a la selección de los componentes para el sistema neumático regenerativo completo, dejando el capítulo 3 para el sistema de control y afines.

2.3.6. Sistema Neumático

Motor Neumático.

Su dimensionamiento proviene de la potencia entregada por el sistema de transmisión. Los fabricantes de motores neumáticos proveen gráficas de potencia, torque y consumo de aire vs revoluciones por minuto para que el cliente pueda seleccionar aquel que se ajuste mejor a sus necesidades.

En la sección 2.1. se observó que la ciudad de Quito, en sentido Norte-Sur, posee pendientes no mayores a 5° de inclinación. Por otro lado, en sentido Este-Oeste, las pendientes pueden llegar a ser pronunciadas, llegando a ser, en pocos casos hasta de 10°.

Para el presente proyecto, el valor de la potencia más alta para ascender a 12 km/h con una inclinación de 5° es de 308 W (tabla 2.4.). Si se desea que el sistema aporte con la mitad de este valor, la potencia del motor neumático será 154 W. Para calcular el torque que debe entregar el motor, se debe realizar una hoja de cálculo en la que se tenga una columna del ángulo de inclinación, otra en donde se tenga la potencia que proporcionará el motor (la potencia de la tabla 2.4. dividida entre 2) y finalmente calcular el torque dividiendo la potencia para la velocidad angular de la rueda posterior. La velocidad angular se calcula con la ecuación 1.10. Los datos de entrada para realizar la hoja de cálculo se presentan en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Variables definidas para el cálculo del torque.

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
V_{1-2} (km/h m/s)	12,00 3,33
ω (rpm rad/s)	96,40 10,09
r_{RP} (in m)	26,00 0,66

(Fuente: Propia)

La tabla 2.7. muestra los datos tabulados del torque requerido por el motor neumático para que pueda cumplir con los criterios de dimensionamiento. Esta información servirá para la selección del motor. La tabla además sirve para poder comparar los torques y las potencias que se van generando con el incremento del ángulo de inclinación y de esta manera relacionar dichos datos con aquellos de las curvas de potencia, torque y velocidad angular que facilitan los fabricantes de motores neumáticos.

Tabla 2.7. Cálculo del torque requerido por el motor.

θ	W1-2 [W]	Tq1-2 [N.m]
0,00	11,54	1,14
0,50	25,80	2,56
1,00	40,07	3,97
1,50	54,34	5,38
2,00	68,60	6,80
2,50	82,85	8,21
3,00	97,11	9,62
3,50	111,35	11,03
4,00	125,59	12,44
4,50	139,82	13,85
5,00	154,04	15,26
5,50	168,24	16,67
6,00	182,44	18,07
6,50	196,62	19,48
7,00	210,79	20,88
7,50	224,95	22,28
8,00	239,09	23,68
8,50	253,21	25,08
9,00	267,31	26,48
9,50	281,39	27,87
10,00	295,45	29,27
10,50	309,49	30,66
11,00	323,51	32,05
11,50	337,50	33,43
12,00	351,47	34,82
12,50	365,42	36,20

13,00	379,33	37,58
13,50	393,22	38,95
14,00	407,08	40,33
14,50	420,91	41,70
15,00	434,71	43,06
15,50	448,47	44,43
16,00	462,20	45,79
16,50	475,90	47,14
17,00	489,56	48,50
17,50	503,19	49,85
18,00	516,78	51,19
18,50	530,33	52,53
19,00	543,84	53,87
19,50	557,31	55,21
20,00	570,74	56,54

(Fuente: Propia)

Para visualizar de mejor manera, se muestra en la figura 2.18. una gráfica de la potencia (W_{1-2}) vs el ángulo de inclinación (θ).

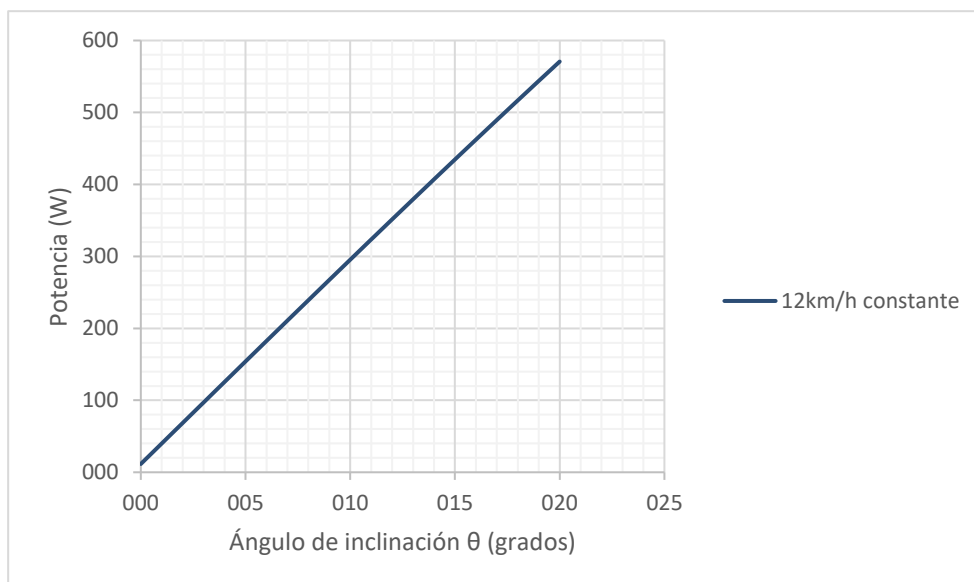


Figura 2.18. Potencia vs. ángulo de inclinación en la aportación.

(Fuente: Propia)

Estos datos son importantes porque servirán para la selección del motor neumático, tema a tratarse en el subcapítulo 2.4.

Electroválvulas.

Estos elementos deben manejar al menos la presión máxima permitida en el motor neumático. Por otra parte, las variables eléctricas que se implementen deberán ser definidas en el capítulo 3 (Diseño y construcción del sistema de control).

Válvulas y Mangueras.

Al igual que las electroválvulas, deben manejar al menos la presión máxima permitida en el motor neumático.

En esta sección, se incluyen las válvulas de alivio. Estas válvulas son empleadas para proteger al sistema de un posible accidente. Por ejemplo, el reservorio tendrá una presión máxima, que es aquella en la que el material puede colapsar. Sin embargo, existe una presión de diseño que es aquella inferior a la máxima pero superior a la presión de operación. En este sentido, la válvula de alivio debe ser configurada apenas sobre la presión de diseño.

Reservorio.

Este elemento es dimensionado tomando en cuenta las siguientes características:

- Material resistente.- Debe tener una resistencia que pueda abastecer la presión de trabajo del motor neumático.
- Material liviano.- El peso agregado a la bicicleta juega un papel importante en el proceso de aportación debido a que la componente del peso que va en sentido contrario al del movimiento es mayor mientras más pesado es todo el conjunto.
- Esteticidad y comodidad. - La ubicación y el tamaño del reservorio deben ser tales que le permita al usuario poder desenvolverse naturalmente, sin que interfiera con el pedaleo, el giro del volante, la resistencia contra el viento, etc.
- Durabilidad. - Debe tener la capacidad de soportar una posible caída, golpe o abolladura debido a distintos factores que podrían ocurrir.

Unidad de filtración y lubricación.

Las unidades de filtración y lubricación son dimensionadas de acuerdo a los parámetros requeridos por el motor neumático. Estos parámetros los especifica el fabricante del motor

y son: el tamaño de partículas que se deben filtrar, la lubricación requerida para un punto de trabajo específico y el diámetro de entrada y salida.

2.3.7. Selección de los elementos del Sistema Neumático

Bajo los criterios de dimensionamiento expresados en el subcapítulo 2.3., se procede a seleccionar los componentes del sistema de transmisión y del sistema neumático, tomando en cuenta la factibilidad de conseguir en el mercado local dichos componentes y únicamente en casos aislados (por fabricación) se serán provistos de mercados internacionales.

Para iniciar con la selección, se procede a especificar los elementos del sistema neumático, tomando como referencia el diagrama de la figura 2.19. que indica los elementos a ser empleados tanto para la regeneración como para la aportación.

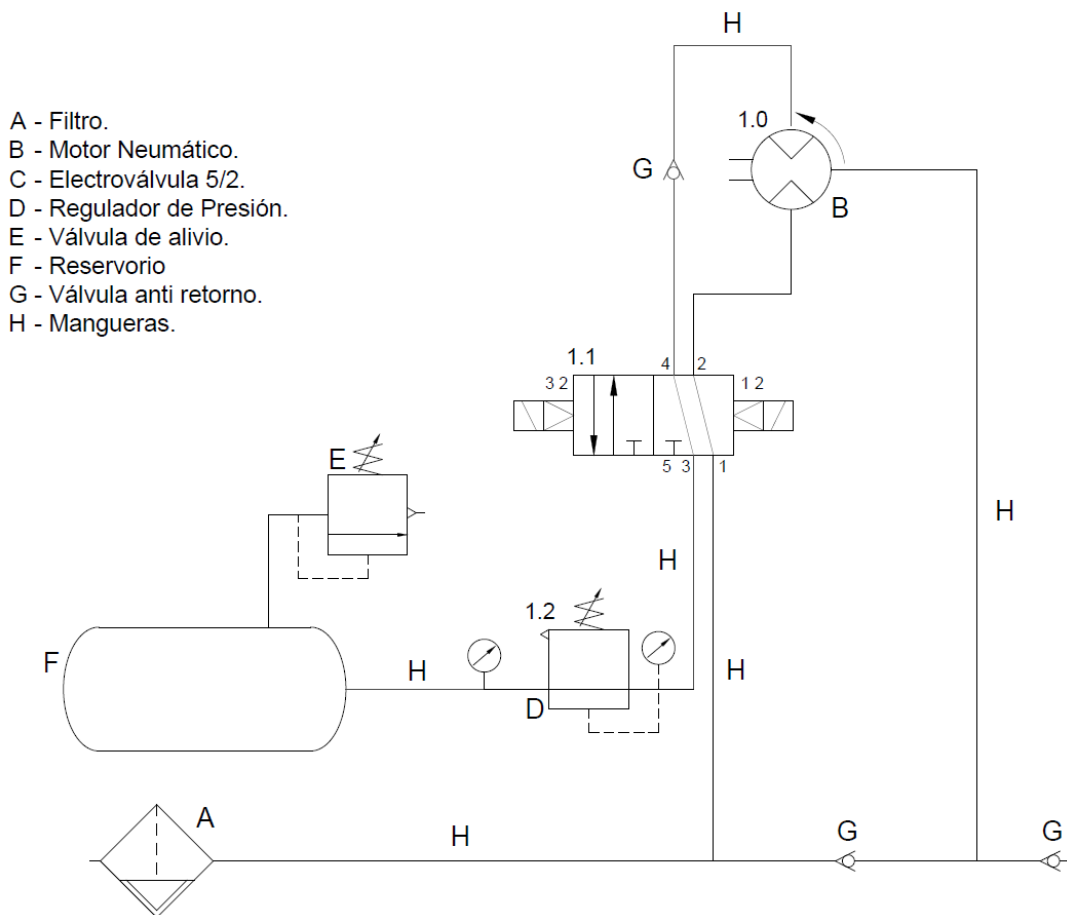


Figura 2.19. Elementos empleados en los procesos de regeneración y aportación.

(Fuente: Propia)

A) Unidad de filtración

El fabricante del motor neumático expone que se deben cumplir los siguientes requerimientos para el óptimo funcionamiento del mismo:

- Diámetro de las mangueras. – Requerimiento seleccionado de acuerdo a la figura 2.28.
- Preparación de aire. – Para cumplir este requerimiento, se ha seleccionado el filtro que separa partículas mayores a 40 micras.
- Lubricación. – La lubricación no es un requerimiento que exige el fabricante, sin embargo, se especifica que extiende la vida útil de las paletas. Para el proyecto se deberá lubricar el motor neumático cada cierto tiempo, de acuerdo al manual de usuario de la bicicleta.

La tabla 2.8. presenta las características de la unidad de filtración.

Tabla 2.8. Características de la unidad de filtración. [24]

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Conexión entrada y salida	1/4" F-NPT
Presión Máx. (bar psi)	9,3 135
Temperatura de trabajo (°C °F)	5 - 60 41 - 140

La figura 2.20. indica la unidad de filtración que se instalará en el sistema neumático. Los puertos de entrada y salida de aire son de 1/4" F-NTP y la presión máxima se limita a 135 psi (9.3 bar). La temperatura de trabajo puede ir de 41 a 140 °F (5 a 60 °C). La hoja de datos de las unidades de filtración se encuentra en el Anexo IV.



Figura 2.20. Unidad de filtración. [24]

(Fuente: Propia)

B) Motor Neumático

Se procederá a seleccionar un motor neumático que cumpla con los requerimientos de potencia, torque y velocidad angular para un ángulo máximo en el proceso de aportación de 5°. Por lo tanto, se deberá buscar un motor neumático de paletas que las características de la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Características del motor de paletas a seleccionar.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Potencia (W)	154
Torque (N.m)	15,3
ω (rpm)	100

(Fuente: Propia)

Bajo estas definiciones, resultó difícil encontrar este elemento en el mercado local, debido a que no son ensamblados y mucho menos fabricados en el país; su empleo no es común y pocas máquinas los implementan. Esto implica que el motor debe ser provisto desde el exterior, razón por la cual se procedió a buscar fabricantes en internet.

Se pudieron encontrar fabricantes de motores de paletas con diferentes características. Entre ellos se encontraron: Gast, Atlas Copco, Bosch, Parker, etc. Sin embargo, todas estas fábricas no venden directamente sus productos, por el contrario, si se desea adquirir alguno, se debe contactar con el proveedor local o con el distribuidor más cercano.

Esto resultó en una gran limitante debido a que los costos de importación son altos y además se realizan únicamente bajo pedido del comprador con tiempos de entrega de 4 a 8 semanas. Sin embargo, en el Anexo V se encuentran las hojas de datos de varios motores de paletas ofrecidos por diferentes fabricantes. Entre las hojas de datos se determinó un motor que cumple con los requerimientos del proyecto. Este motor es del fabricante Atlas Copco, reversible, reducción de velocidades mediante engranes epicicloidales, modelo LZB33-AR004-11 [25]. Las características del motor seleccionado se muestran en la tabla 2.10. para una presión de 91 psi o 6.27 bar de acuerdo a los datos del fabricante.

Tabla 2.10. Características del motor neumático de paletas seleccionado. [25]

<i>Características</i>	<i>Valor</i>
Potencia Máxima (W)	230
Velocidad a la máxima potencia (rpm)	190
Torque a la máxima potencia (N.m)	11,4
Velocidad libre (rpm)	385
Consumo de aire a la máxima potencia (l/s)	7,8
Torque mínimo de arranque (N.m)	15,6
Stall torque (N.m)	24
Peso (kg)	1,02

Este motor neumático tiene las características más cercanas para que cumpla con las bases de diseño. Además, posee un conjunto de engranajes planetarios en su interior para reducir la velocidad angular entre el eje del rotor y el eje de salida, lo cual le permite operar en los procesos relacionados con el proyecto. Por otra parte, existen otros motores neumáticos que ejecutan la reducción mediante un sistema de rueda dentada y tornillo sin fin, configuración que no permitiría ejecutar los dos procesos. Por este motivo, los modelos de algunos fabricantes fueron apartados y no considerados dentro de la selección.

A continuación, se muestra en la figura 2.21. las curvas de la potencia, el torque y el consumo de aire en función de la velocidad angular en rpm.

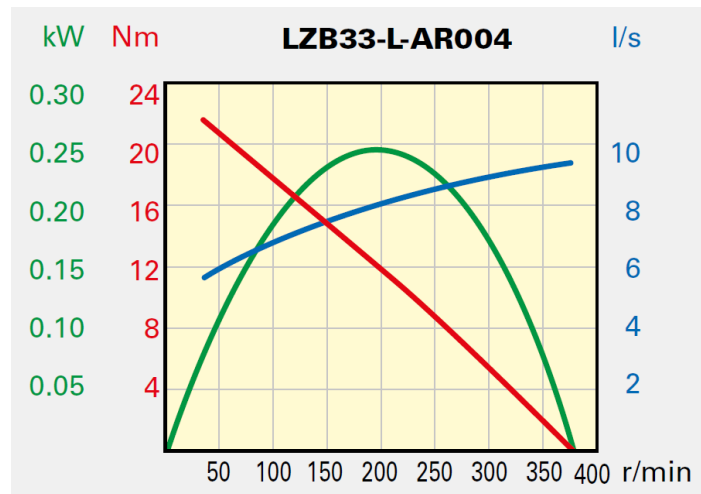


Figura 2.21. Curvas de desempeño del motor neumático seleccionado. [25]

De esta manera, el motor neumático queda seleccionado para que pueda cumplir su función en la etapa de aportación. Por otro lado, el consumo de aire se encuentra expresado condiciones de aire libre. En la gráfica 2.19. se puede ver claramente que mientras la velocidad angular va decreciendo, el torque incrementa y el consumo de aire es menor. Esta es una ventaja importante en los motores neumáticos porque se acoplan al escenario de trabajo, siendo estables en todo momento, a diferencia de los motores eléctricos.

En el anexo IV se muestran las dimensiones y la documentación con las características del motor neumático. La figura 2.22. muestra el motor neumático adquirido. Los puertos de carga y descarga son de 1/4" F-NTP.



Figura 2.22. Fotografía del motor neumático LZB33AR004 11.

(Fuente: Propia)

C) Electroválvula

De acuerdo al diagrama neumático realizado en la ingeniería de detalle, se requiere de una electroválvula biestable 5/2, es decir de 5 puertos y 2 posiciones. La variable que define la selección de este elemento es la presión de trabajo máxima a la que estará sometido el motor neumático y el voltaje requerido para que actúe.

Para este elemento se encontró un distribuidor de válvulas de la marca AIRTAC. La electroválvula, al requerir de una potencia eléctrica, debe actuar con los mismos parámetros de operación del sistema de control que se abordará en el capítulo 3. En este sentido, se seleccionó una electroválvula de las características mostradas en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Características de la electroválvula seleccionada. [24]

<i>Características</i>	<i>Valor</i>
Presión de trabajo (psi bar)	21 a 114 1,5 a 8
Tiempo de respuesta (s)	0,05
Ciclaje (ciclos/s)	5
Voltaje de operación (VDC)	12
Potencia requerida (W)	2,5
Puertos A, B y P	1/4" F-NPT
Puertos R y S	1/8" F-NPT

En el anexo IV se adjunta la respectiva hoja de datos de la electroválvula seleccionada. La figura 2.23. muestra la electroválvula adquirida.

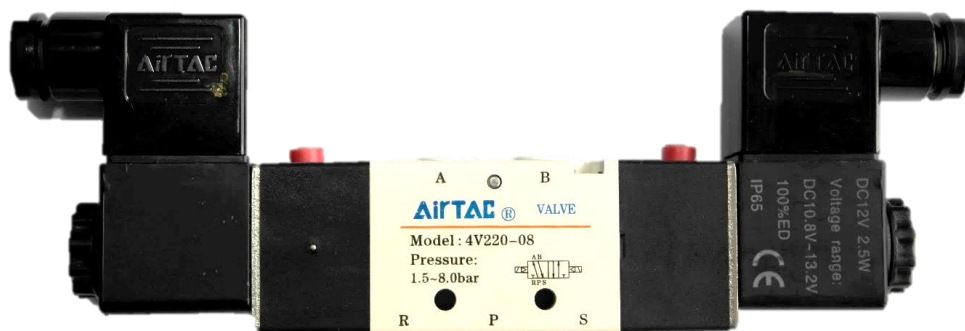


Figura 2.23. Fotografía de la electroválvula 4V220-08.

(Fuente: Propia)

D) Válvula reguladora de presión

Esta válvula, corresponde a la serie AC2000 de Airtac que normalmente es parte del conjunto: filtro, regulador y lubricador. La válvula ha sido removida del conjunto debido a que, de acuerdo a la figura 2.19. es necesaria aguas abajo de la descarga del reservorio para que de esta manera se pueda regular el torque en el motor. Las características de la válvula reguladora de presión se indican en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Características de la válvula reguladora de presión seleccionada. [24]

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Conexión entrada y salida	1/4" F-NPT
Presión Máx. (bar psi)	9,3 135
Temperatura de trabajo (°C °F)	5 - 60 41 - 140
Conexión al manómetro	1/8" F-NPT

La figura 2.24. muestra la válvula reguladora de presión con sus puertos de entrada y salida de aire. En el Anexo IV se indica su hoja de datos.



Figura 2.24. Fotografía de la válvula reguladora de presión.

(Fuente: Propia)

E) Válvula de alivio

Están diseñadas para soportar diferentes presiones de acuerdo al ajuste que se le configure mediante el resorte y un tornillo de apriete. La válvula incluye 4 resortes que son intercambiables de acuerdo a las necesidades del usuario. La tabla 2.13. indica sus características.

Tabla 2.13. Características de la válvula de alivio seleccionada.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Conexión al proceso	1/4" M-NPT
Material	Bronce
Presión Máx. (bar psi)	9,3 135

Para el presente proyecto se empleará el resorte de color rojo, que de acuerdo a la hoja de datos del fabricante de la válvula (Anexo IV) permite aliviar entre 50 y 100 psi (3.45 y 6.9 bar), de acuerdo al ajuste del tornillo regulador que se ve a la derecha de la figura 2.25.

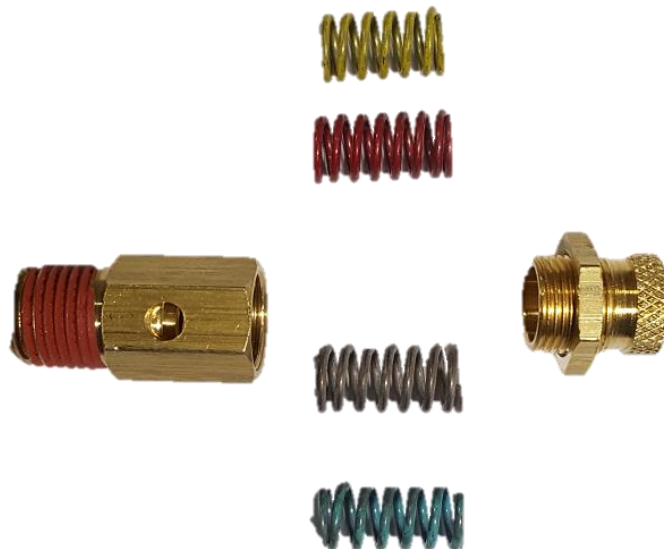


Figura 2.25. Fotografía válvula de alivio.

(Fuente: Propia)

F) Reservorio

Retomando las directrices especificadas en el criterio para el dimensionamiento de los diferentes componentes del subcapítulo 2.3., se elaborará una tabla con los materiales de los que puede realizarse. Una vez seleccionado el material del reservorio, se procederá a evaluar su ensamblaje de acuerdo a los criterios antes mencionados.

La identificación de cada característica a ser valorada se muestra a continuación y se presenta en orden de importancia. En corchetes se encontrará la ponderación dada a cada característica para luego obtener un resultado que permita elegir entre estos materiales.

- 1) Peso. - Mientras menor sea el peso, mayor valoración. [30%]
- 2) Construcción. - Mientras más fácil de construir, mayor valoración. [25%]
- 3) Ensamblaje. - Mientras más fácil sea el ensamblaje, mayor valoración. [20%]
- 4) Durabilidad. - Mientras más dure con el tiempo, mayor valoración. [15%]
- 5) Esteticidad. - Mientras más estético se observe, mayor valoración. [10%]

A continuación, se muestra la tabla 2.14. que representa la valoración de acuerdo al material y de acuerdo la prioridad de sus características:

Tabla 2.14. Tabla de valoraciones para selección del material.

Material	1	2	3	4	5	Total
Acero A36	1 [10%]	2 [16,7%]	1 [6,7%]	2 [10%]	2 [6,7%]	8 [50,1]
Aluminio	2 [20%]	1 [8,3%]	2 [13,3%]	3 [15%]	3 [10%]	11 [66,6%]
PET	3 [30%]	3 [25%]	3 [20%]	1 [5%]	1 [3,3%]	11 [83,3%]

(Fuente: Propia)

La ponderación de las características del material a emplear para el reservorio proviene de las particularidades del proyecto. Por ejemplo, no es aceptable un recipiente que pueda representar la mitad del peso de la bicicleta y que, en consecuencia, desbalancee la bicicleta en el caso de tener una inclinación pronunciada. Por este motivo, la característica que más ponderación tiene es el peso. De esta manera, se propone el empleo de un tanque

conformado por un conjunto de botellas de PET (polyethylene terephthalate por sus siglas en inglés) que es un tipo de plástico polimérico empleado en envases de bebidas.

La presión a la que una botella de PET falla está entre los 140 y 160 psi o 9,65 y 11,03 bar. Sin embargo, los motores neumáticos son fabricados para soportar una presión máxima aproximada de 90 a 100 psi. Es decir, la presión de diseño llegaría a ser los 2/3 de la presión de rotura, obteniéndose un factor de seguridad de 1.67 en el caso de que el reservorio se encuentre a la máxima presión de operación; mas, el comportamiento cíclico del sistema hará que las presiones fluctúen siempre entre presiones de trabajo menores.

G) Válvulas anti retorno y accesorios

Estas válvulas fueron seleccionadas de la misma distribuidora de elementos neumáticos Airtac. Están diseñadas para soportar presiones de trabajo de hasta 114 psi u 8 bar. La figura 2.26. indica la válvula anti retorno.



Figura 2.26. Fotografía de la válvula check o antirretorno.

(Fuente: Propia)

Otros elementos de línea, tales como codos, tes y uniones roscadas son necesarias en el proyecto. La figura 2.27 muestra estos elementos.



Figura 2.27. Fotografía de algunos accesorios de línea.

(Fuente: Propia)

H) Mangueras

Estos elementos flexibles interconectan los componentes neumáticos. Están diseñadas para soportar al menos 114 psi (8 bar). El fabricante del motor neumático incluye ciertas recomendaciones que se indican en la figura 2.28. Además, se especifica que los diámetros de las mangueras de la figura aplican hasta 3 m de longitud. Para distancias más cortas, se pueden emplear diámetros menores siempre y cuando se satisfagan las funciones deseadas.

Motor Type	Inlet connection thread (BSP) (NPTF)	Exhaust connection thread (mm)	Inlet hose diameter (mm)	Exhaust hose diameter (Non-reversible) (mm)	Exhaust hose diameter (Reversible) (mm)
LZB 14	1/8" -	1/8"	5.0	8.0	6.3
LZB 22	1/8" -	1/4"	6.3	10.0	8.0
LZB 33	1/4" -	1/4"	8.0	10.0	8.0
LZB 42	1/4" -	1/2"	10.0	13.0	13.0
LZB 46	1/4" -	1/2"	10.0	16.0	13.0
LZB 54	3/8" -	1/2"	13.0	16.0	13.0
LZB 66	3/8" -	3/4"	13.0	20.0	13.0
LZB 77	1/2" 1/2" - 14	-	16.0	-	16.0

Figura 2.28. Recomendaciones de diámetros de mangueras. [25]

La figura 2.29. muestra la manguera a ser empleada para el proyecto. En ella se puede ver la identificación como: material, diámetro y la presión máxima de operación.



Figura 2.29. Manguera empleada en el proyecto.

(Fuente: Propia)

2.4. Diseño de detalle del sistema de transmisión

Debido a que el sistema neumático regenerativo está diseñado para aportar con el 50% de la potencia requerida, las catarinas y la cadena empleadas normalmente para la impulsión del usuario mediante el pedaleo, satisfacen el requerimiento para la transmisión del nuevo sistema. Por este motivo, se emplearán las catarinas y la cadena comúnmente utilizadas en bicicletas urbanas.

Sin embargo, por la naturaleza del proyecto (regenerar la energía y emplearla en ciertos tramos), el sistema de transmisión debe ser cuidadosamente diseñado para alcanzar los objetivos planteados.

Se debe recordar que el sistema de transmisión requiere de modificaciones que permitan ejecutar los procesos de regeneración y aportación. Por este motivo, el sistema debe tener ciertas características que se citan a continuación.

2.4.1. Proceso de Regeneración

La potencia de la rueda posterior debe ser transferida al motor neumático para que éste, mediante sus paletas, pueda comprimir el aire y almacenarlo. Este procedimiento implica que una catarina debe estar anclada al movimiento rotacional de la rueda en todo momento del proceso.

2.4.2. Proceso de Aportación

La potencia almacenada en el reservorio debe ser transmitida mediante el motor neumático hacia el eje de la rueda posterior. Esto se puede lograr mediante una catarina anclada al movimiento rotacional de la rueda. Dicha catarina debe ser la misma que se emplea en el proceso de regeneración. Sin embargo, para el caso en que el ascenso fuera extenso y la disponibilidad de energía se haya agotado, es necesario que el usuario pueda emplear la bicicleta como una bicicleta estándar de ciudad, es decir, como una bicicleta sin las funciones de regeneración ni aportación. Para lograr esta característica, se deberá tener una catarina libre, que no esté anclada ya sea al eje de giro de la rueda posterior o al eje de giro del motor neumático.

La ubicación del sistema de transmisión está definida por el espacio que se puede disponer para su montaje. En este sentido y de manera general, el eje de la rueda posterior de una bicicleta estándar tiene espacio para montar el conjunto de catarinas (también llamadas piñones) que permiten ejecutar los cambios de velocidad, la manzana con sus respectivos cojinetes y en determinados casos, los frenos de disco. A lo largo de este eje se ha observado la posibilidad de disponer de un espacio que puede estar disponible (como en el caso de la bicicleta del presente proyecto) o puede obtenerse mediante la disminución de un par de catarinas. Como se expresó anteriormente, en la bicicleta a emplear se dispone de un espacio de aproximadamente 27 mm del lado izquierdo. La figura 2.30. indica el lugar en el que se puede realizar el acoplamiento del sistema de transmisión.

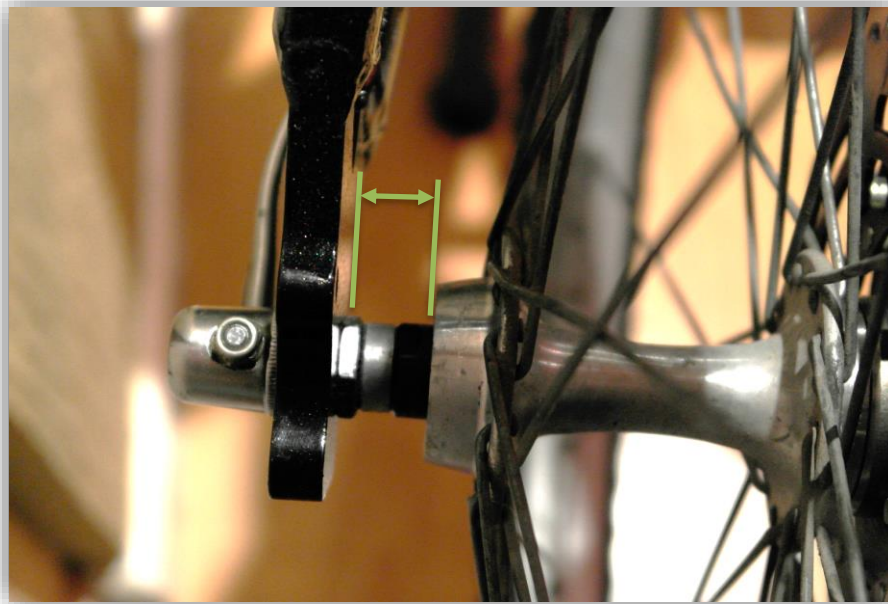


Figura 2.30. Ubicación del acople para la transmisión.

(Fuente: Propia)

2.4.3. Acoplamiento

Para la realización del diseño del acople anclado a la manzana de la rueda posterior, es importante conocer: las funciones que debe cumplir, la geometría a la que se va a acoplar, el tipo de acoplamiento y las fuerzas generadas debido a la rotación de la rueda para la condición más exigente.

Funciones y Geometría.

El acople debe ser diseñado de tal manera que pueda fijarse a la manzana de la rueda posterior para transmitir la potencia, condición necesaria para satisfacer los procesos de regeneración y aportación. Además debe contemplar un espacio para una catarina libre, la misma que será empleada para que el usuario tenga la opción de usar su bicicleta sin ejecutar ningún proceso. La figura 2.31. indica un bosquejo de la forma que tendría el acople. Se puede notar que el acople abarca el cono saliente de la manzana para sujetarse sobre éste. A su vez, el acople presenta cambios de sección para que se puedan montar los elementos que permitirán satisfacer las funciones antes indicadas.

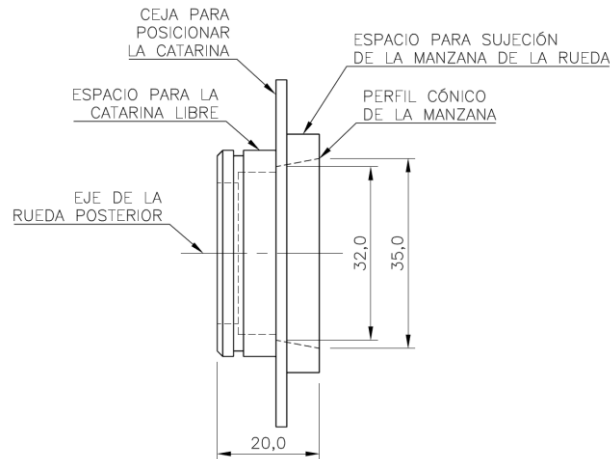


Figura 2.31. Bosquejo inicial del acople.

(Fuente: Propia)

Tipo de anclaje Acople - Manzana.

La sujeción entre estos elementos puede ser realizada mediante pernos o soldadura. Sin embargo, la opción de la soldadura queda descartada por dos razones: el proceso para soldar sobre el material de la manzana (aluminio) requiere de equipos especiales y que, la ceja para posicionar la catarina podría requerir de soldadura y dado que las catarinas son de acero, se tendrían materiales disímiles entre el acople y la catarina.

La opción de sujetar los elementos mediante pernos puede ser empleada siempre que se pueda realizar la sujeción en el perfil cónico de manera confiable.

Cálculo.

El acoplamiento mediante pernos queda determinado por la cantidad y el diámetro de los mismos. Para esto, es necesario encontrar la fuerza que genera el torque en el límite de la conexión acople – manzana. Para esto se analizará primero la condición más exigente.

La condición más exigente es aquella en la que el torque llega a ser máximo. Entonces, se elegirá el torque máximo entre los dos procesos bajo las siguientes condiciones: la mayor velocidad y el mayor ángulo de inclinación de diseño. La tabla 2.15. despliega la información necesaria para definir el torque máximo.

Tabla 2.15. Torque máximo para cada proceso.

Proceso	Ángulo de inclinación (°)	Velocidad máxima (km/h m/s)	Torque (N.m)
Regeneración	10	30 8,88	53,48
Aportación	5	12 2,78	30,52

(Fuente: Propia)

Entonces, tomando la ecuación 1.16. y aplicándola al caso en el que se desea conocer la fuerza generada a cierta distancia conocido un torque, se tiene:

$$F = \frac{2 \cdot T_q}{D_m} [N]$$

donde:

T_q : Torque. $[N \cdot m]$

D_m : Diámetro de la base de la manzana. $[m]$

F : Fuerza. $[N]$

Al calcular la fuerza F se tiene:

$$F = \frac{2 \times 53,48 [N \cdot m]}{0,032 [m]} = 3342,5 [N]$$

Esta fuerza será aplicada en la sección transversal de una cantidad de tornillos sometidos a cortante. La figura 2.32. muestra un gráfico del acoplamiento.

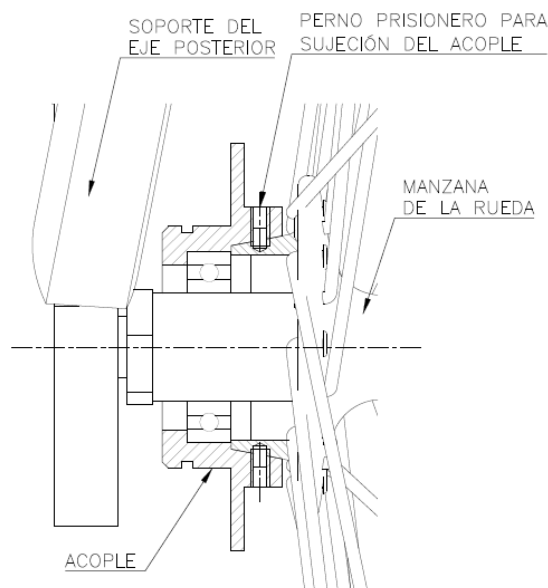


Figura 2.32. Acoplamiento mediante pernos prisioneros.

(Fuente: Propia)

Se desea tener un factor de seguridad de 2, entonces la ecuación 1.29. se emplea para obtener el esfuerzo cortante permisible para pernos con una resistencia a la fluencia de 400 MPa. A la vez, se sustituye la resistencia a la fluencia por la resistencia a la fluencia a cortante que se representó con la ecuación 1.28.

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{perm}}$$

$$\tau_{perm} = \frac{0,577 S_y}{n} = \frac{0,577 \times 400 [MPa]}{2} = 115,4 [MPa]$$

Para determinar la cantidad de pernos requeridos, se encuentra el área total requerida A_T de acuerdo a la ecuación 1.25.

$$A_T = \frac{F}{\tau_{perm}} = \frac{3342,5 [N]}{115,4 [MPa]}$$

$$A_T = 2,9 \times 10^{-5} [m^2]$$

La cantidad de pernos de sujeción dependerá de la división entre el área total y el área de la sección individual del perno. Se ha conformado la tabla 2.16. que indica en cada columna un perno de diferente diámetro de acuerdo a la denominación de rosca métrica, mientras que en cada fila se identifica una propiedad geométrica que al final determinará la cantidad de pernos que se requieren.

Tabla 2.16. Cálculo de la cantidad de pernos de acuerdo a la rosca métrica. [13]

Rosca Métrica	M2.5x0.5	M3x0.5	M4x0.7	M5x0.8	M6x1
Área de la sección (m ²)	3,39-06	5,03E-06	8,78E-06	1,42E-05	2,01E-05
Cantidad pernos (unidades)	9	6	4	3	2

(Fuente: Propia)

La selección del perno se encuentra en función del espacio disponible para la sujeción del acople sobre el perfil cónico de la manzana indicado en la figura 2.30. Este espacio es de aproximadamente 5mm, lo que implica que el perno a seleccionar debe ser menor a 5mm. El perno M4 también puede ser descartado porque únicamente quedaría un milímetro de material en sentido axial, obteniéndose un sector más débil que aquel obtenido si se empleara un perno M2.5 o M3. Por otro lado, la opción de poner el perno M2.5 sería la mejor debido a que deja un espacio mayor de material en sentido axial y porque la cantidad de pernos permitiría tener una mejor fijación y una distribución de esfuerzos uniforme sobre los mismos, sin embargo, esta denominación no es comercial. La opción restante es la de

los pernos M3, que satisface los requerimientos de diseño y de espacio. Entonces, de acuerdo a la tabla 2.16. se requieren distribuir seis pernos en la circunferencia del cono de la manzana y del acople. Esta distribución puede realizarse de manera precisa, debido a que la manzana tiene 18 orificios para la sujeción de los radios de la bicicleta. De esta manera se emplean dichas perforaciones como guía para distribuir los seis pernos, se mejora la fijación entre el acople y la manzana y se mantiene el factor de seguridad.

Es importante mencionar que en el subcapítulo 2.5. se realizará el ensamblaje virtual, el mismo que permitirá detectar posibles interferencias, dimensiones y el arreglo general entre elementos. Del ensamblaje virtual se obtienen los planos mecánicos de los elementos del sistema de transmisión y el soporte.

2.4.4. Relación de transmisión

Las velocidades angulares de la rueda posterior y el motor neumático se enlazan mediante la relación de transmisión. Al retomar las ecuaciones 1.8. y 1.10. se puede determinar la velocidad a la que girará el eje del motor neumático siempre y cuando se conozca la cantidad de dientes de las catarinas en relación y la velocidad angular de la rueda posterior. Se evaluarán las velocidades angulares del motor neumático para cuando se requiera ejecutar el proceso de aportación a 12, 10 y 8 km/h (3,33 , 2,78 y 2,22 m/s respectivamente) Entonces, la velocidad angular de la rueda posterior se calcula con la ecuación 1.10. dando el siguiente resultado para una velocidad de 12 km/h.

$$\omega_{RP} = \frac{3,33}{0.3302} \left[\frac{rad}{s} \right] = 10,09 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

La tabla 2.17. indica un resumen de las velocidades angulares en la rueda posterior, que sirven como datos de entrada para encontrar la velocidad angular del motor neumático.

Tabla 2.17. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático.

Velocidad aportación		Velocidad angular Rueda Posterior	
km/h	m/s	rad/s	rpm
12,00	3,33	10,09	96,40
10,00	2,78	8,41	80,33
8,00	2,22	6,73	64,27

(Fuente: Propia)

En la ecuación 1.8. se despeja ω_{MN} para encontrar la velocidad angular del eje del motor neumático.

$$\omega_{MN} = \frac{\omega_{RP} \cdot N_{RP}}{N_{MN}} \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Se puede notar que la velocidad angular del motor neumático depende del número de dientes de las catarinas en relación. Esto sucede porque las catarinas tienen un tamaño de diente definido dependiendo del tipo de cadena empleada. Entonces, el diámetro de paso de la catarina queda definido mediante el número de dientes. Por este motivo, la ecuación antes mencionada se encuentra en función del número de dientes y no en función del diámetro.

En el mercado se pueden encontrar catarinas de 15, 17, 19 y 21 dientes debido a que usualmente se comercializan en conjunto para la transmisión de una bicicleta de ciudad. Por ejemplo, para determinar la velocidad angular del motor neumático ω_{MN} para un sistema de 17 dientes en el eje de la rueda posterior y 15 dientes en el eje del motor neumático cuando la bicicleta se desplaza a 12 km/h, se obtiene:

$$\omega_{MN} = \frac{10,09 \left[\frac{rad}{s} \right] \cdot 17}{15}$$

$$\omega_{MN} = 11,44 \left[\frac{rad}{s} \right] = 109,25 \text{ rpm}$$

De esta manera, se forma la tabla 2.18. para evaluar las velocidades angulares en el eje del motor neumático con los distintos juegos de catarinas (15, 17, 19 y 21 dientes) cuando la velocidad de la bicicleta es de 12 m/s.

Tabla 2.18. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 12 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	96.40	109.25	122.11	134.96
	17	85.06	96.40	107.74	119.08
	19	76.10	86.25	96.40	106.55
	21	68.86	78.04	87.22	96.40

(Fuente: Propia)

A continuación, las tablas 2.19. y 2.20. evalúan las velocidades angulares del motor neumático cuando la bicicleta lleva una velocidad de 10 m/s y 8 m/s respectivamente, siguiendo el mismo procedimiento que el empleado en la tabla 2.15.

Tabla 2.19. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 10 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	80,33	91,04	101,75	112,47
	17	70,88	80,33	89,78	99,23
	19	63,42	71,88	80,33	88,79
	21	57,38	65,03	72,68	80,33

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20. Evaluación de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 8 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	64,27	72,83	81,40	89,97
	17	56,71	64,27	71,83	79,39
	19	50,74	57,50	64,27	71,03
	21	45,90	52,02	58,15	64,27

(Fuente: Propia)

Con estas tres tablas, en la sección de la selección de los elementos del sistema de transmisión, se evaluará el conjunto de catarinas que trabaje de mejor manera en base a la previa selección del motor neumático.

2.4.5. Selección de los elementos del sistema de transmisión

Los elementos que se deben seleccionar para el sistema de transmisión son la cadena y las catarinas. Para la selección de la cadena se buscará una identificación técnica de

aquellas utilizadas en las bicicletas urbanas. Para la selección de las catarinas se analizarán las tablas 2.10., 2.11. y 2.12 conjuntamente.

2.4.6. Cadena

Básicamente, la cadena es identificada mediante la denominación ANSI. La figura 2.33. muestra dicha denominación para algunas cadenas y adicionalmente se indican las propiedades de las mismas.

Número de cadena ANSI	Paso, pulg (mm)	Ancho, pulg (mm)	Resistencia mínima a la tensión, lbf (N)	Peso promedio, lbf/pie (N/m)	Diámetro del rodillo, pulg (mm)	Espaciamento de torones múltiples, pulg (mm)
25	0.250 (6.35)	0.125 (3.18)	780 (3 470)	0.09 (1.31)	0.130 (3.30)	0.252 (6.40)
35	0.375 (9.52)	0.188 (4.76)	1 760 (7 830)	0.21 (3.06)	0.200 (5.08)	0.399 (10.13)
41	0.500 (12.70)	0.25 (6.35)	1 500 (6 670)	0.25 (3.65)	0.306 (7.77)	— —
40	0.500 (12.70)	0.312 (7.94)	3 130 (13 920)	0.42 (6.13)	0.312 (7.92)	0.566 (14.38)
50	0.625 (15.88)	0.375 (9.52)	4 880 (21 700)	0.69 (10.1)	0.400 (10.16)	0.713 (18.11)
60	0.750 (19.05)	0.500 (12.7)	7 030 (31 300)	1.00 (14.6)	0.469 (11.91)	0.897 (22.78)
80	1.000 (25.40)	0.625 (15.88)	12 500 (55 600)	1.71 (25.0)	0.625 (15.87)	1.153 (29.29)
100	1.250 (31.75)	0.750 (19.05)	19 500 (86 700)	2.58 (37.7)	0.750 (19.05)	1.409 (35.76)
120	1.500 (38.10)	1.000 (25.40)	28 000 (124 500)	3.87 (56.5)	0.875 (22.22)	1.789 (45.44)
140	1.750 (44.45)	1.000 (25.40)	38 000 (169 000)	4.95 (72.2)	1.000 (25.40)	1.924 (48.87)
160	2.000 (50.80)	1.250 (31.75)	50 000 (222 000)	6.61 (96.5)	1.125 (28.57)	2.305 (58.55)
180	2.250 (57.15)	1.406 (35.71)	63 000 (280 000)	9.06 (132.2)	1.406 (35.71)	2.592 (65.84)
200	2.500 (63.50)	1.500 (38.10)	78 000 (347 000)	10.96 (159.9)	1.562 (39.67)	2.817 (71.55)
240	3.00 (76.70)	1.875 (47.63)	112 000 (498 000)	16.4 (239)	1.875 (47.62)	3.458 (87.83)

Figura 2.33. Clasificación de cadenas de acuerdo a la ANSI.

(Fuente: Propia)

Se determina que el número ANSI para las cadenas de bicicleta es el 41. De esta manera queda definida la selección de la cadena.

2.4.7. Catarinas

Debido a que el motor neumático debe tener la capacidad de “aportar” con una cantidad de potencia, se deberá seleccionar la combinación que permita tener un torque que sea igual o mayor al requerido para cumplir con el valor de 5° de inclinación de ascenso.

La condición bajo la que el motor neumático girará a mayor velocidad angular es para cuando el usuario ascienda a 12 km/h. Por lo tanto, se toma la figura 2.22. para identificar el intervalo de velocidades que permiten cumplir con la condición antes mencionada y obtener la potencia y el torque requeridos. El procedimiento es el siguiente:

- En la figura 2.22., se trazan líneas horizontales que representen la potencia (154,04 W) y el torque (15.26 N.m) requeridos para el presente caso de estudio. Para poder realizar la intersección de las líneas de potencia, torque y consumo, la figura 2.22. fue trazada nuevamente con escalas en el eje x e y conocidas y así determinar con precisión la velocidad angular. La figura 3.34. indica los intervalos de velocidad angular.

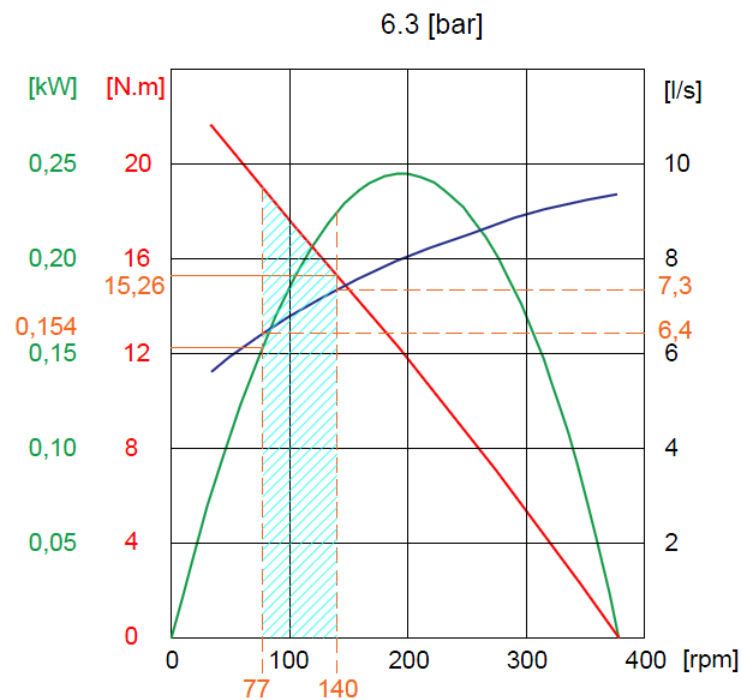


Figura 2.34. Intervalo de la velocidad angular en ascenso a 12 km/h.

(Fuente: Propia)

Se observa que el intervalo que cumple con las condiciones se encuentra mientras el motor neumático funcione entre 77 y 140 rpm, y se tenga 6,3 bar de presión.

- Debido a que no siempre se tendrá la disponibilidad de presión de 6,3 bar, se debe determinar el intervalo de velocidades angulares que cumpla con los requerimientos. Para esto, el fabricante presenta una tabla (figura 2.35) de factores de corrección para presiones diferentes de 6,3 bar de presión.

Correction factors					
Air Pressure		Output	Speed	Torque	Air Consumption
(bar)	(psi)				
7	101	1.13	1.01	1.09	1.11
6	87	0.94	0.99	0.95	0.96
5	73	0.71	0.93	0.79	0.77
4	58	0.51	0.85	0.63	0.61
3	44	0.33	0.73	0.48	0.44

Figura 2.35. Factores de corrección para diferentes presiones.

(Fuente: Propia)

Con esta tabla, se procede a elaborar la gráfica de curvas de desempeño para 6, 5, 4 y 3 bar de presión. La figura 2.36. presenta las cuatro curvas de desempeño en donde se indican los intervalos de velocidad angular que satisfacen los requerimientos.

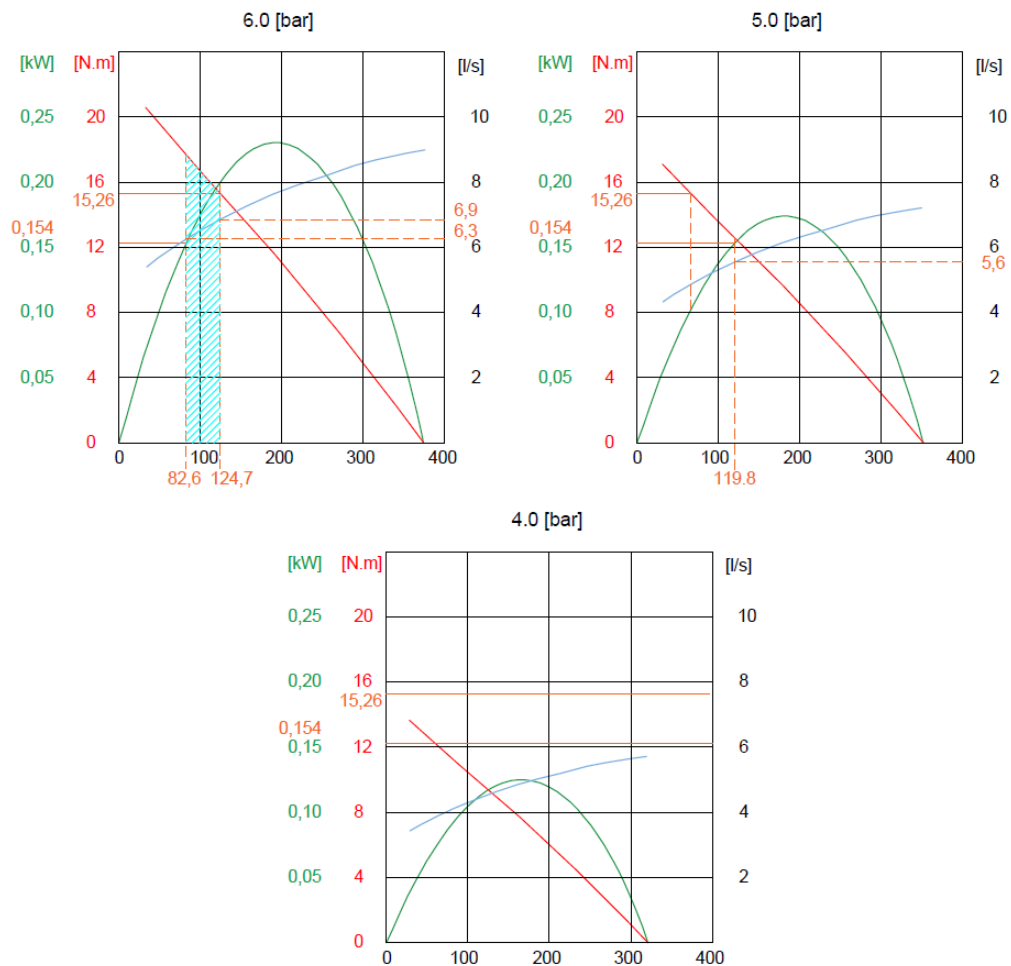


Figura 2.36. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 12 km/h.

(Fuente: Propia)

Las curvas a 6 bar indica un intervalo de velocidades angulares de 82,6 a 124, 7 rpm. Las curvas a 5 bar indican que para el torque requerido, la potencia aportada por el motor es más baja que la requerida. Por otro lado, para la potencia requerida, el torque aportado por el motor es más bajo que el requerido. Al comparar las curvas a 5 y 4 bar, se puede ver que a 5 bar el motor neumático tiene la posibilidad de aportar con la potencia requerida mas no con el torque requerido. Por esta razón, en la gráfica a 5 bar, el intervalo que más se acerca para que el proceso de aportación sea útil, sería aquel algo menor o igual a 119,8 rpm. Esta condición se elige porque satisface la potencia requerida y el usuario completará el torque faltante mediante el pedaleo.

- El siguiente paso es determinar el conjunto de catarinas apropiadas para la aportación. La tabla 2.21. es la tabla 2.18. con las celdas resaltadas para los datos que se acercan tanto para el valor requerido que se obtuvo de las curvas de desempeño como para el que satisface la potencia pero no el torque en el funcionamiento a una menor presión.

Tabla 2.21. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 12 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	96,40	109,25	122,11	134,96
	17	85,06	96,40	107,74	119,08
	19	76,10	86,25	96,40	106,55
	21	68,86	78,04	87,22	96,40

(Fuente: Propia)

La tabla 2.21. revela que mientras menor es la presión disponible, la cantidad de conjuntos de catarinas que pueden funcionar para la aportación resultan menores.

- A continuación, se ejecutan los mismos pasos realizados anteriormente, pero esta vez con los datos de potencia y torque requeridos para un ascenso a 10 km/h. Se presenta la figura 2.37. que muestra las curvas de desempeño a diferentes

presiones. Además, la tabla 2.22. es la tabla 2.19. con las celdas resaltadas con los mismos criterios de la tabla 2.21. para una mejor visualización de resultados.

La gráfica revela que a 6 bar, el intervalo de velocidades para el motor neumático va de 65,1 a 128,3 rpm. Sin embargo, al igual que en el caso de ascenso a 12 km/h se tiene que a 5 bar puede satisfacerse la potencia requerida a una velocidad angular de 88,4 rpm aunque con un torque menor. En la tabla 2.22. se reflejan los conjuntos de catarinas que permitirán la aportación.

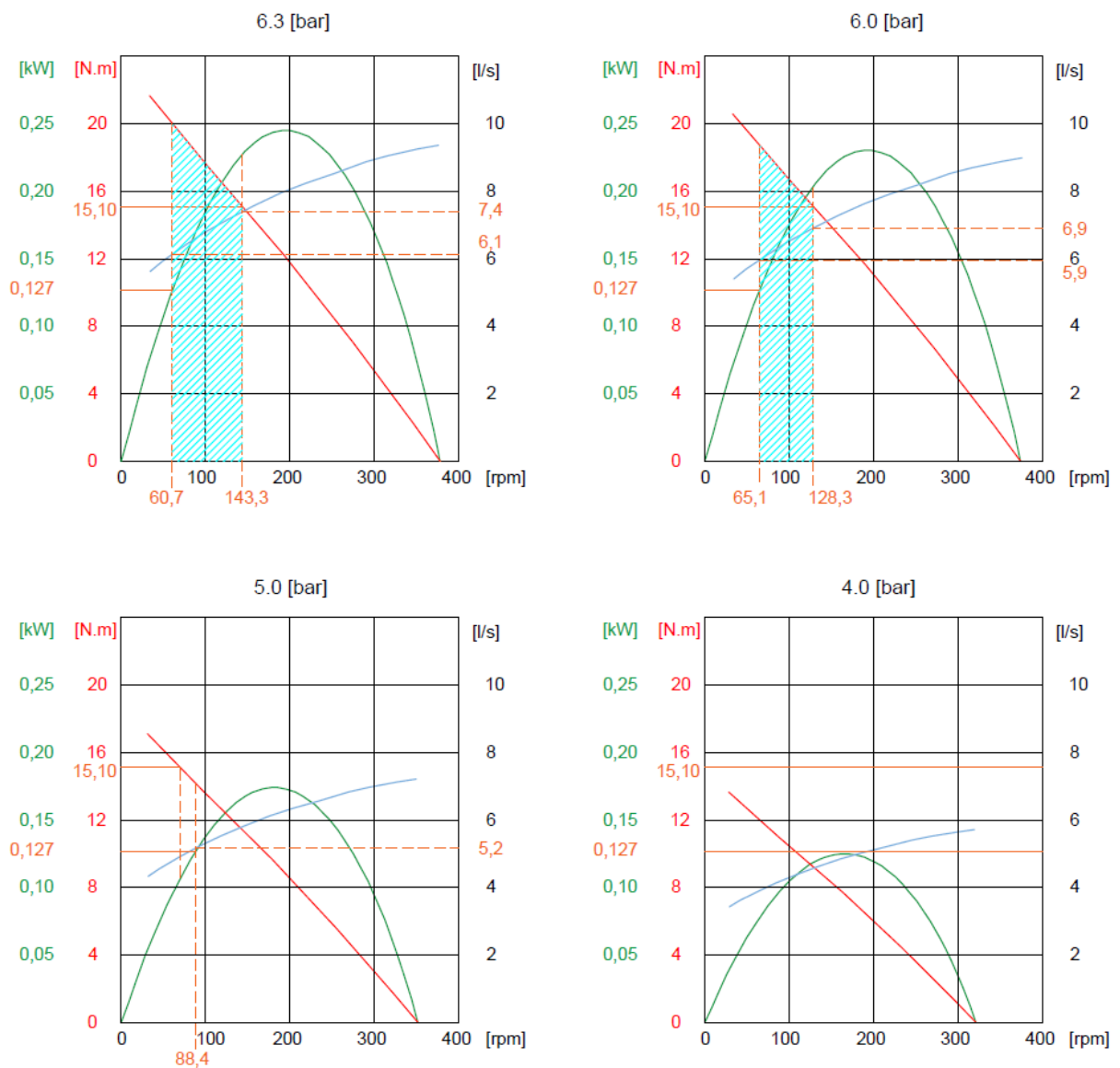


Figura 2.37. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 10 km/h.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.22. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 10 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	80,33	91,04	101,75	112,47
	17	70,88	80,33	89,78	99,23
	19	63,42	71,88	80,33	88,79
	21	57,38	65,03	72,68	80,33

(Fuente: Propia)

- Finalmente, se realizan las curvas de desempeño para un ascenso a 8 km/h, obteniéndose la figura 2.38. y la tabla 2.23. con las celdas resaltadas bajo los mismos criterios anteriores.

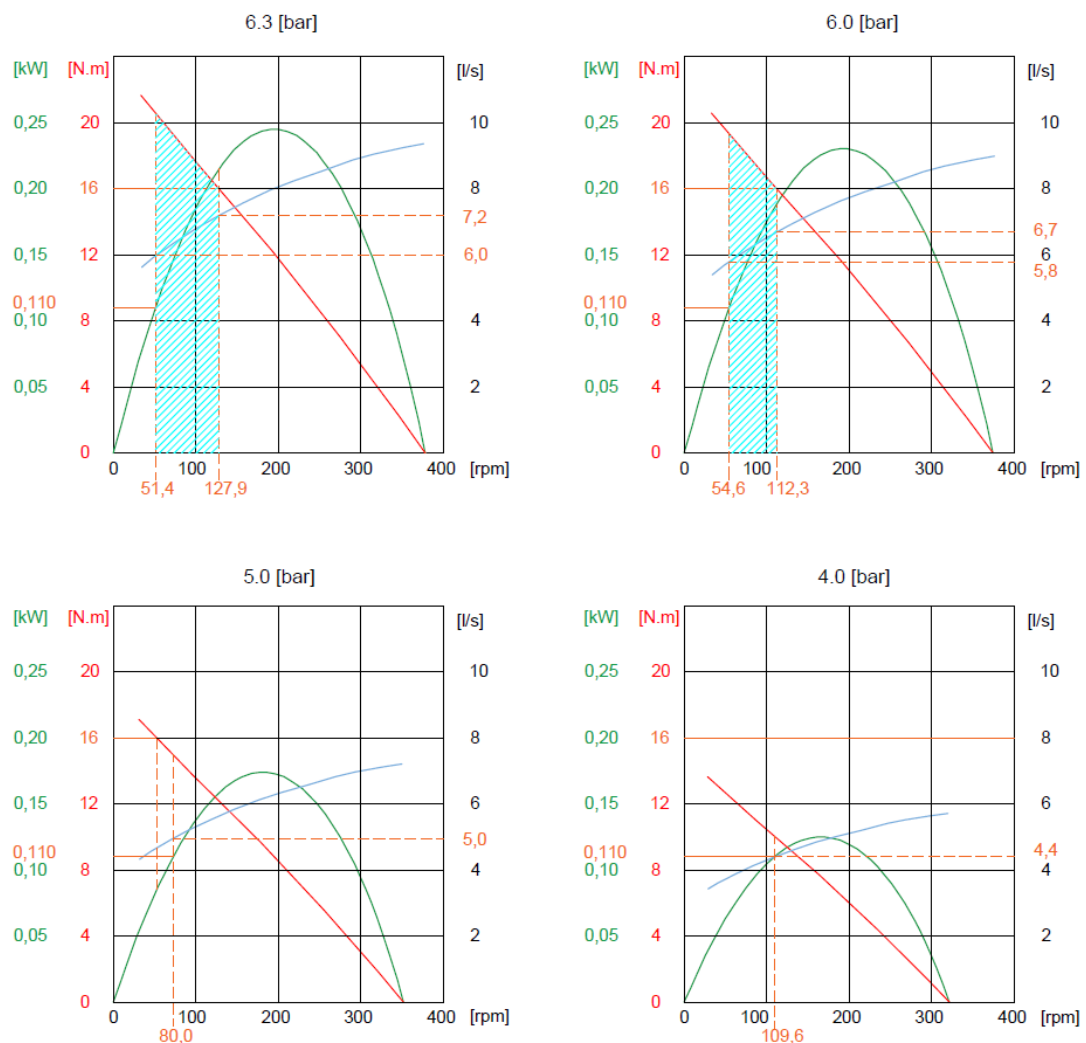


Figura 2.38. Curvas de desempeño a diferentes presiones para 8 km/h.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.23. Selección de las velocidades angulares en el eje del motor neumático para 8 km/h.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	64,27	72,83	81,40	89,97
	17	56,71	64,27	71,83	79,39
	19	50,74	57,50	64,27	71,03
	21	45,90	52,02	58,15	64,27

(Fuente: Propia)

La particularidad de que un ascenso a 8 km/h se pueda tener cierto aporte con una presión de 4 bar, indica que mientras menor sea la velocidad de ascenso, la aportación tiene lugar a menores presiones, aunque sin cumplir con el torque requerido. En la tabla 2.18. se han coloreado aquellas velocidades angulares en las que el motor neumático funcionaría de manera cercana a lo requerido.

- Para concluir la selección del conjunto de catarinas, la tabla 2.24. indica el conteo de celdas resaltadas en las tablas 2.21., 2.22. y 2.23. para su respectivo conjunto de catarinas.

Tabla 2.24. Resumen para la selección del conjunto de catarinas.

Velocidad angular del motor neumático (rpm)		Dientes de la catarina de la Rueda Posterior			
		15	17	19	21
Dientes de la catarina del Motor Neumático	15	1	3	2	1
	17	0	1	3	2
	19	0	0	1	3
	21	0	0	0	1

(Fuente: Propia)

Se determina que los conjuntos de catarinas (motor neumático – rueda posterior) que funcionan de la mejor manera para el proyecto son: 15 – 17, 17 – 19 y 19 – 21.

Se elige la primera opción debido a que los diámetros de las catarinas son menores, lo que permite que el montaje y el diseño del soporte para el motor neumático se simplifique de cierta manera.

2.5. Ensamblaje virtual del sistema de transmisión y neumático

El ensamblaje virtual es una herramienta que permite realizar el diseño de las piezas a fabricar o modificar, en un escenario 3D mediante un programa que permita crear dichas piezas. Para el presente caso, se ha realizado el modelado virtual o 3D de la bicicleta completa en el programa Autocad. De esta manera, todo lo que se desee agregar, quitar o modificar sobre ésta, se lo realizará bajo los criterios que requiera el proyecto. Para dar inicio, se presenta en la figura 2.39. la bicicleta sin modificaciones mostrando el nivel de detalle al que se puede llegar con el modelado 3D y su funcionalidad.



Figura 2.39. Bicicleta modelada en 3D.

(Fuente: Propia)

Se procede a modelar todos los componentes del sistema neumático. Éstos se muestran en la figura 2.40. con el fin de que una vez ensamblados sobre la bicicleta, sean de fácil

identificación y a su vez, se pueda realizar la planilla de materiales que se requieren para el proyecto.



Figura 2.40. Componentes neumáticos modelados en 3D.

(Fuente: Propia)

La figura 2.41. indica los componentes del sistema de transmisión que fueron seleccionados en el subcapítulo anterior.

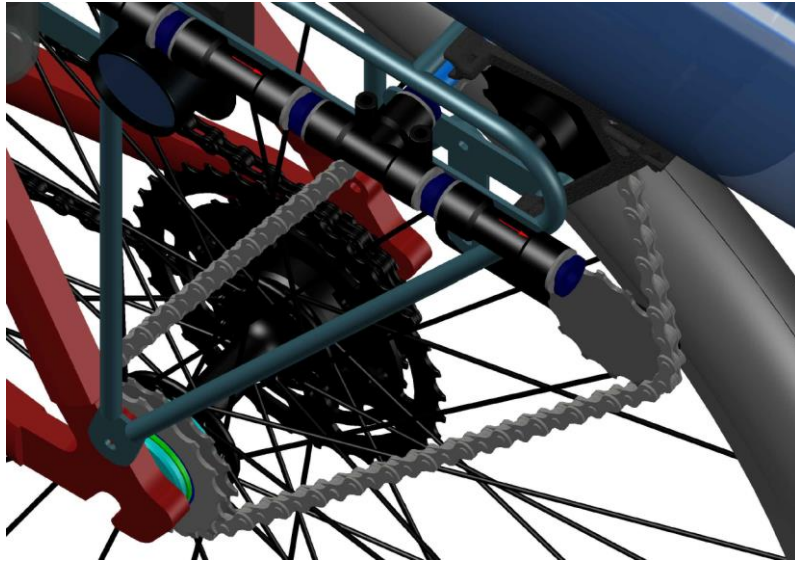


Figura 2.41. Componentes 3D del sistema de transmisión.

(Fuente: Propia)

Para la realización del ensamblaje, integrando los sistemas neumático y de transmisión, se debe tener un soporte que permita la sujeción de todos los elementos involucrados en el diseño de los sistemas mencionados. La figura 2.42. muestra el soporte para los elementos desde varias perspectivas para poder apreciar sus partes.

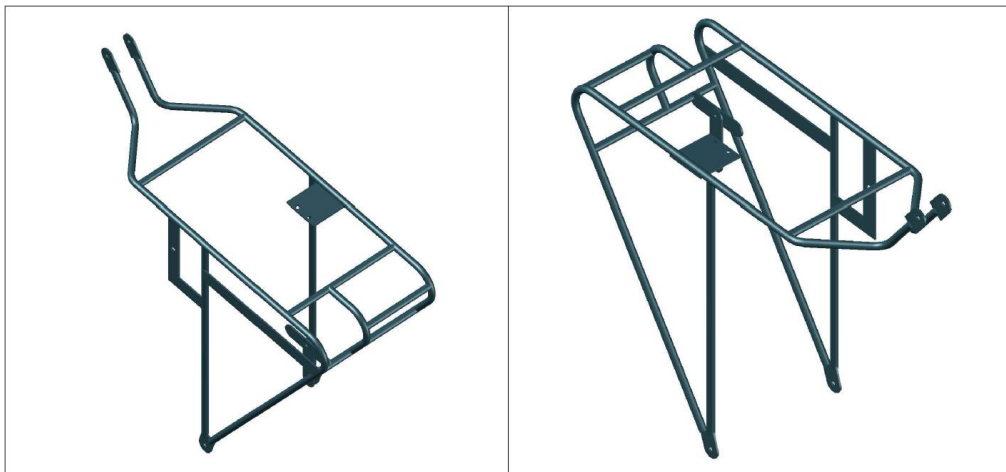


Figura 2.42. Soporte 3D para sujeción de los elementos.

(Fuente: Propia)

Los elementos son incorporados en el soporte de tal manera que su ubicación sea adecuada y para lograr esto se debe cumplir lo siguiente:

- Utilización de la menor cantidad de accesorios para reducir pérdidas.
- Accesibilidad visual de los instrumentos (indicadores).
- Accesibilidad para maniobra y montaje de mangueras, válvulas, etc.

- Eliminar cualquier posible interferencia con el desempeño del usuario.

Bajo estos criterios, la figura 2.43. muestra el soporte de la bicicleta con los elementos ensamblados al mismo.

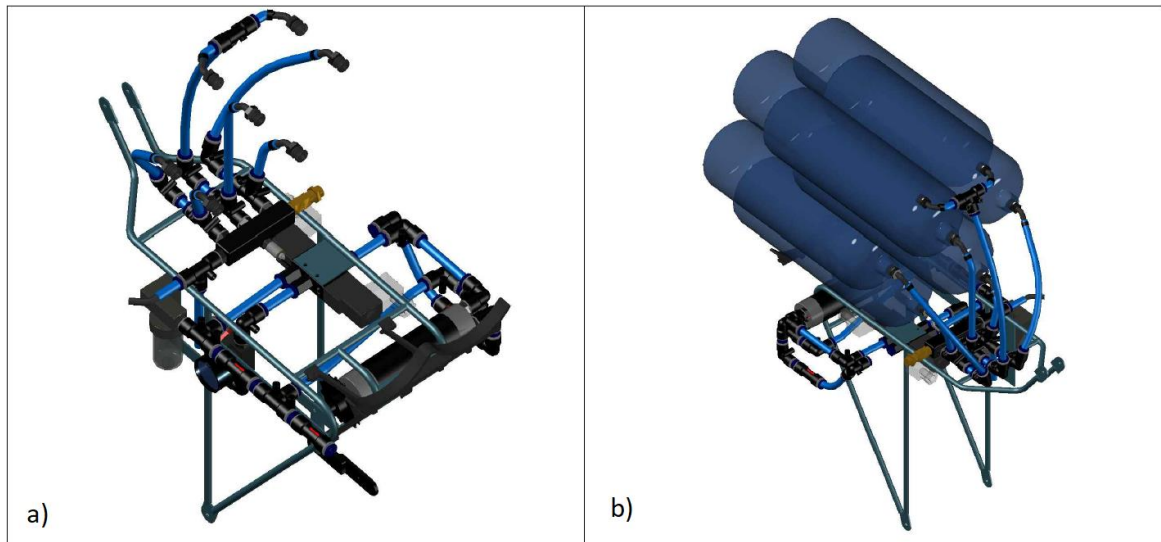


Figura 2.43. Ensamblaje 3D de los elementos al soporte, a) sin reservorio y b) con reservorio.

(Fuente: Propia)

Finalmente, del ensamblaje virtual se obtuvo la figura 2.44. que indica la bicicleta con el sistema de transmisión y neumático.



Figura 2.44. Ensamblaje virtual completo.

(Fuente: Propia)

2.6. Fabricación de los elementos del sistema de transmisión

Una vez que se han verificado que no existan interferencias en el ensamblaje virtual, se puede continuar con la fabricación de los elementos requeridos para que el sistema de transmisión quede completo.

En el anexo VI se encuentran los planos mecánicos (de taller y de conjunto) empleados en la fabricación de los elementos. Las figuras 2.45., 2.46., y 2.47. corresponden a las fotografías del soporte, el acople para la rueda posterior y el acople del motor neumático respectivamente.



Figura 2.45. Fabricación del soporte.

(Fuente: Propia)



Figura 2.46. Acoplamiento rueda posterior.

(Fuente: Propia)



Figura 2.47. Acoplamiento Motor.
(Fuente: Propia)

En el anexo X se encuentra un reporte fotográfico de la fabricación de los elementos en general.

2.7. Ensamblaje físico del sistema de transmisión y neumático

2.7.1. Sistema de Transmisión

Los elementos fabricados fueron ensamblados de acuerdo a lo planificado en el diseño virtual. Se comenzó por el ensamblaje del soporte hacia el cuadro de la bicicleta. En la figura 2.48. se aprecia el soporte montado con las facilidades para la sujeción de todos los elementos requeridos por el proyecto.



Figura 2.48. Ensamblaje del soporte.
(Fuente: Propia)

Posteriormente, se ensambla el acople a la rueda posterior y los elementos que sobre éste se ajustan (buje y acople libre). En la figura 2.49. se aprecia la catarina motriz del lado interno y la catarina libre con su respectiva arandela de seguridad del lado externo.



Figura 2.49. Ensamblaje del acople de la rueda posterior.
(Fuente: Propia)

Con el acople en la rueda posterior en su lugar, se procede a montar la llanta para observar el lugar en donde debe instalarse un tensor. La figura 2.50. muestra el tensor en su posición con la cadena.



Figura 2.50. Tensor.
(Fuente: Propia)

La cadena se instala de tal manera que pase por las catarinas del motor neumático, del descarrilador del sistema de transmisión, del acople a la rueda posterior y por el tensor. En la figura 2.51. se visualiza la instalación de la cadena.



Figura 2.51. Instalación de la cadena.
(Fuente: Propia)

Finalmente en la figura 2.52. se visualiza el descarrilador del sistema de transmisión. Este elemento hace posible que la bicicleta pueda funcionar cuando se desee como una bicicleta estándar. Para el montaje de este elemento, se necesitó modificar la geometría de un descarrilador de plato central. El mecanismo permite que mediante la actuación de un cable se pueda cambiar alternar el movimiento entre la catarina que transmite la potencia hacia el motor neumático o viceversa y la catarina libre que simplemente no ejecuta acción alguna sobre el motor neumático.

Con el ensamblaje del sistema de transmisión, se debe verificar el funcionamiento óptimo de la bicicleta, es decir, que el freno posterior, la selección de marchas, la selección del sistema regenerativo, etc., funcionen en conjunto. Concluida esta verificación se procede al ensamblaje del sistema neumático.



Figura 2.52. Descarrilador transmisión.

(Fuente: Propia)

2.7.2. Sistema Neumático

Los elementos de este sistema fueron incorporados sobre el soporte en la parte posterior de la bicicleta. La figura 2.53. indica la electroválvula montada.



Figura 2.53. Electroválvula montada en el soporte.

(Fuente: Propia)

El motor neumático se conecta de acuerdo al estudio de detalle representado en el diagrama neumático. La figura 2.54. muestra las conexiones realizadas sobre éste.

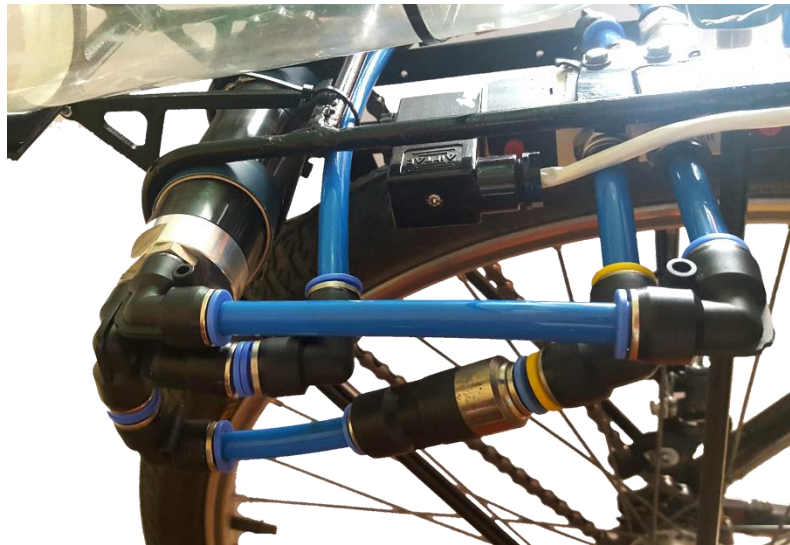


Figura 2.54. Conexiones al motor neumático.

(Fuente: Propia)

Del otro lado de las conexiones al motor neumático se tienen las conexiones que permiten el ingreso de aire al sistema neumático. La figura 2.55. indica el filtro de aire, el lubricador, y el manómetro empleados.



Figura 2.55. Conexiones entrada de aire.

(Fuente: Propia)

Finalmente se tiene el montaje de los elementos que permiten el almacenamiento de aire. En la figura 2.56. se aprecia el manifold que distribuye el ingreso y salida de aire de manera equitativa en el reservorio y la facilidad para carga mediante una fuente externa.

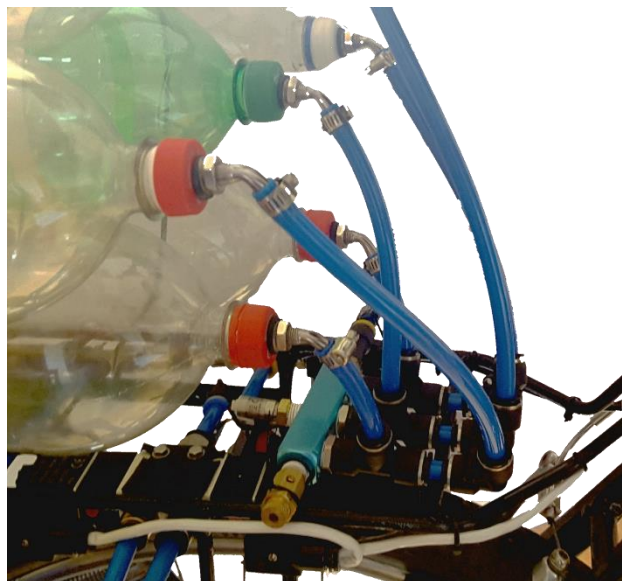


Figura 2.56. Manifold, reservorio y facilidad para carga de aire externo.

(Fuente: Propia)

2.8. Diseño y construcción del sistema de control

El diseño del sistema de control debe considerar el funcionamiento óptimo de sus elementos mediante la programación que controlará las entradas y salidas que se definan. Además, se debe tener en cuenta que este sistema debe tener un espacio en la bicicleta y que deberá acoplarse de tal manera que no interfiera con el desempeño del usuario.

2.9. Diseño conceptual

Se establecen los requerimientos mínimos para el funcionamiento del sistema de control. Estos requerimientos están asociados a los elementos que cada proceso debe incorporar para que queden plenamente definidos. En este sentido, el sistema funciona con un conjunto de sensores que a medida que el usuario cambie de escenario, el sistema podrá definir si se encuentra en un ascenso, un descenso o planicie.

2.9.1. Requerimientos para el funcionamiento en la regeneración

El sistema de control requiere de ciertos elementos que le permitan interactuar con el mundo físico. En este sentido, el sistema estará dotado de un conjunto de sensores y actuadores que bajo distintos escenarios le permitirán tomar acciones para regenerar o aportar, según sea el caso.

En el capítulo 1 y en la ingeniería básica se identificó que la regeneración puede ejecutarse cuando el usuario:

- Se encuentre en un descenso.
- Desea frenar (freno delantero o posterior o ambos).

Para lo cual, los sensores que le ayudarán al sistema de control a detectar estas dos condiciones son:

- Acelerómetro.
- Interruptor de freno.
- Contador de revoluciones en la rueda.

En la figura 2.57. se indica la relación entre los sensores y la información física de la bicicleta que éstos en conjunto pueden brindar.

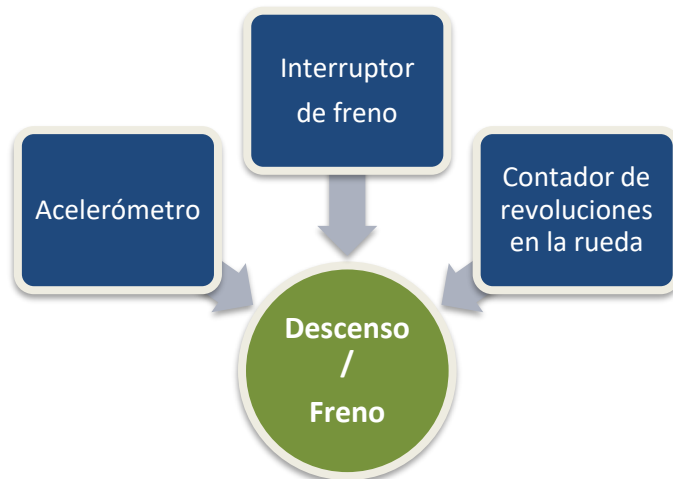


Figura 2.57. Esquema conceptual para la regeneración.

(Fuente: Propia)

2.9.2. Requerimientos para el funcionamiento en la aportación

Este proceso se debe efectuar cuando el usuario:

- Se encuentre en un ascenso.
- Se encuentre pedaleando.

Por lo tanto, la aportación requiere de los siguientes sensores:

- Acelerómetro.
- Contador de revoluciones en la rueda.

En los requerimientos para la aportación se tiene el esquema conceptual mostrado en la figura 2.58. que relaciona los sensores con la información física que proveen.



Figura 2.58. Esquema conceptual para la aportación.

(Fuente: Propia)

De esta manera, los sensores quedan definidos para los procesos de regeneración y aportación. Sin embargo, ambos procesos comparten otros elementos tales como el reservorio y la electroválvula sobre los cuales, el sistema de control debe poder actuar.

2.9.3. Otros requerimientos para el funcionamiento del sistema

Debido a que el sistema neumático regenerativo funciona de manera cíclica, debe considerarse que, durante la regeneración, el motor neumático comenzará a cargar el recipiente y que, por lo tanto, se requiere que la presión llegue hasta cierto límite. Para esto se debe incorporar un sensor de presión en el reservorio.

Por otro lado, existe la electroválvula, elemento que permitirá la carga y descarga del aire comprimido. Esto se efectúa mediante bobinas acopladas en los extremos de la electroválvula con el fin de dirigir el aire, comprimido o a comprimir, por los distintos puertos.

Adicionalmente, el usuario debe estar informado de la presión que posee en el reservorio, la velocidad que lleva, la inclinación a la que se está desplazando, el volumen, etc., datos que le permitirán conocer el estado global del recorrido realizado y del sistema neumático. Para esto, se requiere de una pantalla que pueda desplegar toda la información antes mencionada.

2.9.4. Consolidación de los requerimientos

La figura 2.59 muestra un diagrama consolidado de las entradas (sensores) y salidas (actuadores) requeridas para el funcionamiento íntegro del sistema de control.

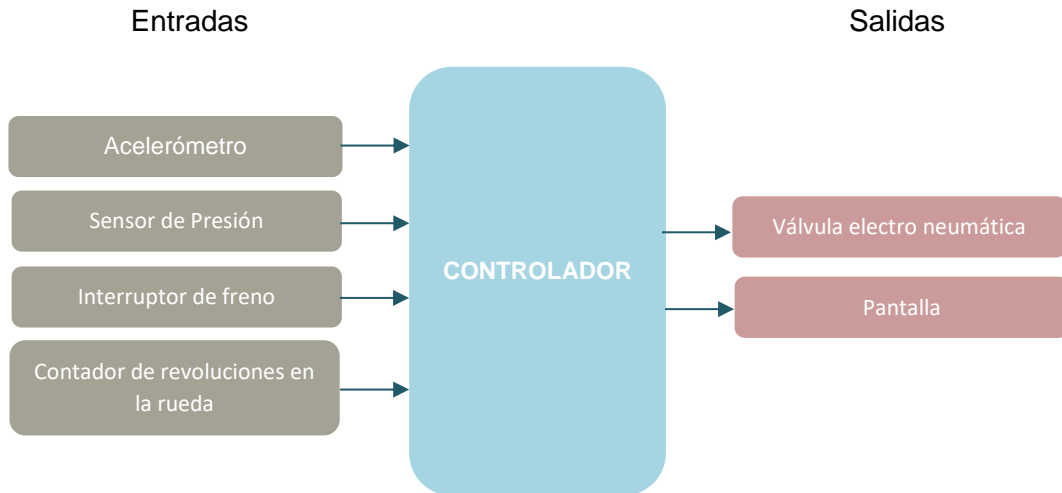


Figura 2.59. Entradas y salidas del sistema de control.

(Fuente: Propia)

A continuación, se describen las funciones de cada entrada o sensor:

- **Acelerómetro.** - Es un elemento electrónico que permite conocer la aceleración del mismo en los tres ejes coordenados. Una aplicación de este elemento es que, mediante la teoría de vectores, se puede determinar la inclinación del mismo respecto de todos los ejes. En el proyecto se empleará para que el sistema de control pueda determinar el ascenso o descenso de una ruta para que finalmente se identifique la oportunidad de regenerar o aportar.
- **Sensor de Presión.** – Elemento electrónico que envía una señal análoga al controlador, para posteriormente, mediante álgebra, determinar la presión a la que se encuentra el reservorio o tanque. Será empleado por seguridad del usuario, puesto que existe una presión límite de cada uno de los elementos neumáticos. Además, este sensor podrá proporcionar la cantidad de energía existente en el sistema neumático.
- **Interruptor de freno.** – Es un contactor que opera como encendido/apagado. Este interruptor lanzará la alerta de que el usuario desea desacelerar y el sistema de control, en conjunto con la posición angular de la bicicleta, determinará el modo de operación a ejecutar.

- Contador de revoluciones de la rueda posterior. – Servirá de apoyo para detectar una desaceleración, velocidad constante o aceleración de la bicicleta. A su vez, este contador permitirá conocer la distancia recorrida por el usuario.

2.10. Diseño básico

Una vez definidos los elementos involucrados en el sistema de control, se procede a identificar los escenarios y las condiciones bajo los que está sometido el conjunto usuario-bicicleta.

Para definir el proceso que el sistema neumático ejecutará, es necesario primero identificar los parámetros de operación de la bicicleta. Posteriormente, con la información arrojada de los parámetros de operación se definirá el sistema de control a implementar.

2.10.1 Parámetros de operación

Los parámetros de operación hacen referencia al conjunto de posibilidades para las cuales el usuario empleará la bicicleta. Se definirán en el grupo “Escenario” al conjunto de parámetros que se identifican con una particularidad física de la ruta, como por ejemplo ascenso. Por otra parte, se definirán en el grupo “Condición” al conjunto de parámetros identificados con una cualidad de la cinemática de la bicicleta como por ejemplo la desaceleración. Con este conjunto de parámetros se procede a formar la tabla 2.25, la misma que indica los procesos de regeneración, aporte o ninguna de las dos por parte del sistema neumático bajo los parámetros descritos anteriormente.

Tabla 2.25. Condiciones y escenarios de operación.

Escenario \ Condición	Descenso	Planicie	Ascenso
Desaceleración	Regenerar	Regenerar	Ninguna
Rapidez constante	Regenerar	Ninguna	Aportar
Aceleración	Ninguna	Aportar	Aportar

(Fuente: Propia)

Al resultado de la unión de un escenario y una condición se le denomina “Modo de Operación”. El modo de operación es de gran ayuda para que el sistema de control pueda interactuar con el mundo físico mediante los sensores. De esta manera si, por ejemplo, el

sistema de control identifica mediante uno de sus sensores que existe una desaceleración y la bicicleta se encuentra en posición de descenso; el sistema de control deberá enviar una señal al actuador o conjunto de actuadores que le permitan realizar la regeneración del sistema neumático. El controlador debe comprobar de momento en momento la condición y el escenario para que el usuario no se distraiga en su recorrido y que éste sea confortable y seguro.

2.10.2. Diagrama de flujo

En la figura 2.60. se puede apreciar el diagrama de flujo básico con el que funcionará el sistema de control.

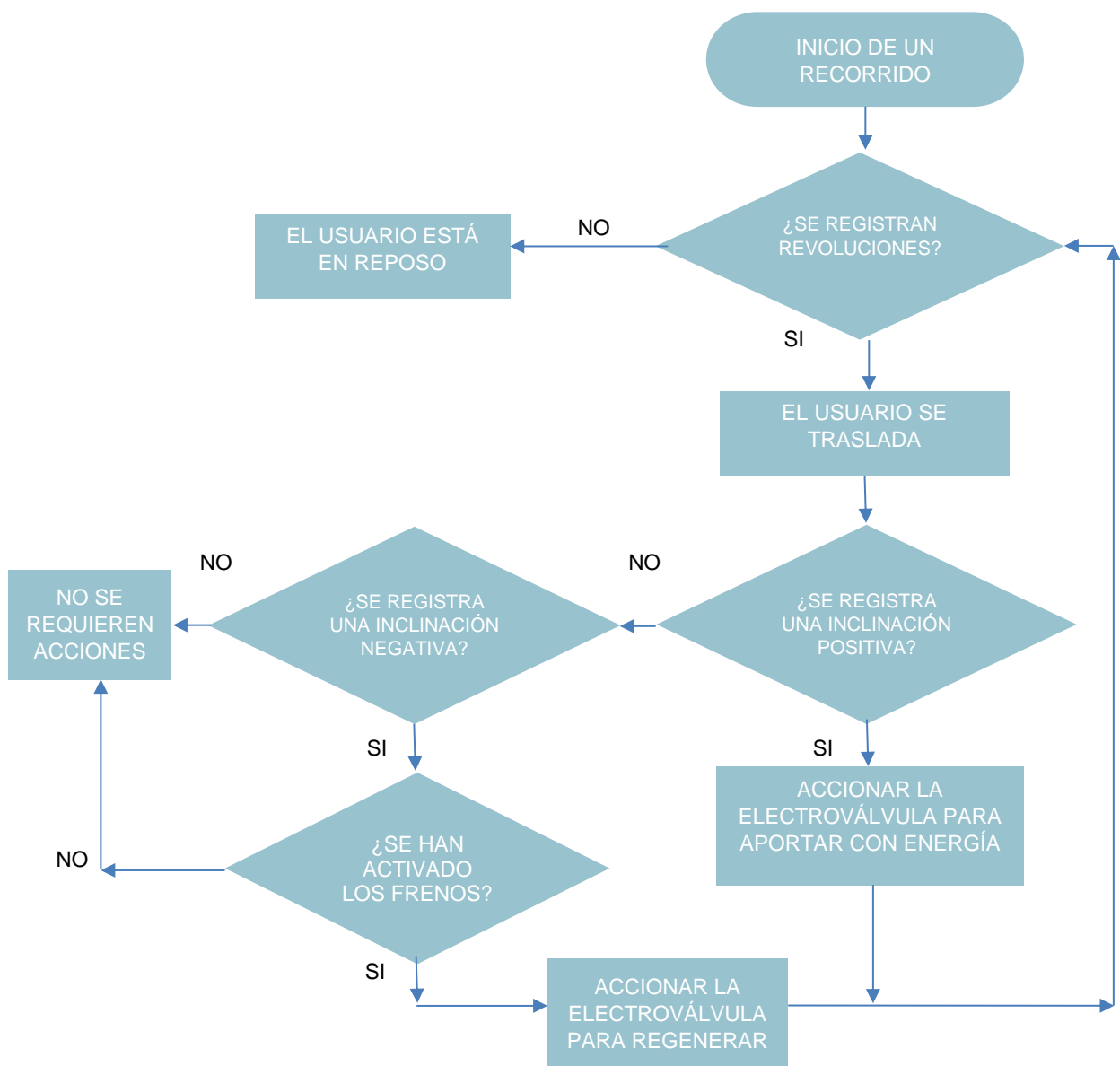


Figura 2.60. Diagrama de flujo básico.

(Fuente: Propia)

2.10.3. Requerimientos mínimos del sistema de control

El sistema de control que se debe incorporar depende del número de elementos que lo componen. A su vez, para que los elementos funcionen, deben ser alimentados mediante corriente eléctrica para posteriormente emitir una señal eléctrica que será interpretada mediante la placa con el microcontrolador incorporado. Por lo tanto, es importante conocer los valores alimentación eléctrica y el número de vías mediante las que cada elemento se comunicará con el controlador.

Por lo tanto, se presenta la tabla 2.26. que indica la cantidad de entradas/salidas requeridas por cada elemento. Además, muestra el voltaje o rango de voltajes con los que se comunicará a la placa. Los valores mostrados tanto para la cantidad de pines como para el voltaje se obtuvieron de las características generales que tienen los elementos disponibles en el mercado.

Tabla 2.26. Pines requeridos para cada elemento y el voltaje de la señal.

Elemento	Pines	Voltaje (VDC)
Acelerómetro	2 (análogos)	0 - 3,3
Sensor de presión	1 (análogo)	1 - 5
Interruptor de frenos	1 (digital)	0 o 5
Contador de revoluciones	1 (digital)	0 o 5
Electroválvula	2 (digitales)	12
Pantalla LCD 16x2	6 (digitales) / 1 (analógico)	0 o 5 / 0 - 5

De la tabla 2.26. se concluye que se requiere una placa que cuente con 4 pines análogos y 10 pines digitales. Con esta información, en el diseño de detalle se seleccionará la placa más adecuada para las necesidades del proyecto.

2.11. Diseño de detalle.

El diseño de detalle define completamente el sistema de control, de tal manera que abarca la selección de los elementos, la integración al sistema de control mediante el diagrama de conexionado, la programación y finalmente el montaje.

2.11.1. Selección de los elementos

Los elementos seleccionados para el presente proyecto están relacionados con aquellos que se emplean para la integración con placas con microcontroladores. La mayoría de ellos funcionan con voltajes que pueden ser provistos desde la misma placa.

Existen otros elementos que requieren de voltajes mayores para su funcionamiento. En estos casos, el voltaje debe ser suministrado mediante otras fuentes.

Más adelante, en el diagrama de conexiones, se visualizarán las conexiones que el sistema de control debe incorporar para su funcionamiento, incluyendo las conexiones desde la fuente de energía eléctrica.

Para visualizar las hojas de datos de todos los elementos del sistema de control, referirse al Anexo VII.

Acelerómetro.

Este elemento puede medir la aceleración en tres ejes ortogonales. Sin embargo, el proyecto requiere únicamente de la medición de la aceleración en dos ejes debido a que la inclinación de la bicicleta queda definida en el plano de desplazamiento. Las especificaciones de este elemento se aprecian en la tabla 2.27. Este acelerómetro posee varias características adicionales como el modo reposo, detección de caída libre y la selección de la precisión.

Tabla 2.27. Especificaciones del acelerómetro. [26]

Característica	Descripción
Modelo	MMA7361
Alimentación	Corriente continua
Voltaje de operación (V)	3,3 o 5,0
Voltaje de salida (V)	0 – 3,3
Corriente de operación (μ A)	400
Corriente en modo descanso (μ A)	3
Número de pines de salida	2 (análogo)

En la figura 2.61. se muestra el acelerómetro con los diferentes puntos de conexión (laterales) que se requieren para su funcionamiento.

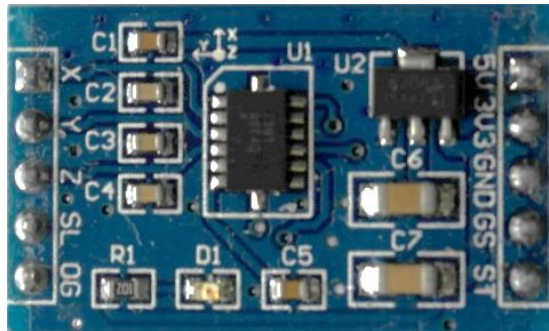


Figura 2.61 Fotografía del acelerómetro MMA7361.

(Fuente: Propia)

Sensor de presión.

Este elemento permite la medición de la presión en el reservorio. La tabla 2.28. indica las especificaciones del sensor de presión. Se alimenta con un voltaje de 12 (V) y emite un voltaje entre 1 y 5 (V) dependiendo de la presión que sensa.

Tabla 2.28. Especificaciones del sensor de presión. [27]

Característica	Descripción
Modelo	PSE530-M5
Alimentación	Corriente continua
Voltaje de operación (V)	12
Voltaje de salida (V)	1 - 5
Presión máxima (bar)	10
Número de pines de salida	1 (análogo)

La figura 2.62. muestra el sensor de presión que consta de la conexión de los cables que transmiten las señales en la parte superior, en el cuerpo presenta la placa con las especificaciones, la parte hexagonal del sensor que sirve para ejercer el torque mediante una llave de 12mm y finalmente la rosca de conexión al proceso que M5.



Figura 2.62. Fotografía del sensor de presión.

(Fuente: Propia)

Interruptor de freno.

El interruptor deberá permitir el paso de corriente y el voltaje que se especifique de acuerdo a la plataforma seleccionada. Este elemento posee un pin de salida (digital). La figura 2.63. muestra los interruptores a instalar en cada manija de freno.



Figura 2.63. Interruptores de freno.

(Fuente: Propia)

Contadores de revolución.

Al igual que el interruptor de freno, este elemento deberá permitir el paso de corriente y el voltaje que se especifique de acuerdo a la plataforma seleccionada. Este elemento posee un pin de salida (digital). La figura 2.64. muestra el sensor magnético empleado para contar las revoluciones de la rueda delantera.



Figura 2.64. Sensor magnético.

(Fuente: Propia)

Electroválvula.

Esta electroválvula fue seleccionada en el capítulo 2 bajo los requerimientos del sistema neumático. La parte eléctrica de la válvula debe seleccionarse en función de las alternativas que presenta el fabricante de las estas válvulas. Para el proyecto se consiguió una electroválvula que actúa mediante un voltaje de 12V, voltaje que favorece su utilización debido a que el sensor de presión también funciona con este valor. La tabla 2.29. indica las especificaciones generales de la electroválvula.

Tabla 2.29. Especificaciones generales de la electroválvula. [24]

Característica	Descripción
Alimentación	Corriente continua
Voltaje de operación (V)	12
Consumo (W)	2,5
Frecuencia máxima (ciclos/s)	5
Número de pines de salida	2 (digitales)

La figura 2.65. indica la caja de la bobina de la electroválvula, en la que se pueden ver los parámetros eléctricos con los que trabaja.



Figura 2.65. Caja de la bobina de la electroválvula.

(Fuente: Propia)

Pantalla LCD 16x2

La tabla 2.30. indica las especificaciones generales de la pantalla LCD 16x2.

Tabla 2.30. Especificaciones generales de la pantalla LCD 16x2. [28]

Característica	Descripción
Alimentación	Corriente continua
Voltaje de operación (V)	5
Consumo de corriente (mA)	20 - 40
Frecuencia máxima (ciclos/s)	5
Número de pines de entrada	6 (digitales)
Número de pines de salida	1 (análogo)

En la figura 2.66. se presenta la pantalla LCD 16x2 que se emplea para mostrar la información durante el trayecto.



Figura 2.66. Pantalla LCD 16x2.

(Fuente: Propia)

Placa de control.

En el mercado se pueden encontrar varios tipos de placas que cubren las necesidades del proyecto. Entre las más comunes se tienen placas de la marca Arduino y ChipKIT. La tabla 2.31. compara 2 modelos de placas equivalentes entre las marcas mencionadas.

Tabla 2.31. Comparación entre dos placas. [22] [29]

Placa	Arduino UNO	ChipKIT UNO 32
Microcontrolador	ATmega328	PIC32MX320F128H
Voltaje de Operación	5	3,3
Voltaje de entrada	7-12	7-15
Pines digitales I/O	14	42
Pines análogos	6	12

Se puede apreciar que la placa ChipKIT UNO 32 posee una cantidad mayor de pines digitales y análogos. Sin embargo, el voltaje de operación de 3,3V hace que pueda entregar como máximo este valor a los sensores. Esto constituye una gran desventaja, debido a que el proyecto tiene sensores que requieren 5V.

Por otro lado, de acuerdo a la tabla 3.2. se observó que el proyecto requiere de 4 pines análogos y 10 pines digitales, razón por la cual la placa Arduino Uno es más que suficiente para cubrir los requerimientos.

En la figura 2.67. se presenta la placa de control Arduino Uno. Se pueden apreciar los digitales, análogos, de alimentación externa. También se puede ver el puerto USB que se emplea para guardar el código de la programación.



Figura 2.67. Arduino Uno. [30]

Fuente de energía eléctrica.

La selección de la fuente de energía eléctrica se encuentra en función del voltaje y corriente de operación que requiere cada uno de los elementos que compone el sistema de control. Ahora que los elementos se tienen seleccionados, se forma la una tabla 2.32. en la que se presentan los voltajes y corrientes de operación de aquellos diferentes de 3,3 o 5 V debido a que estos voltajes son proporcionados por la placa de control. De esta manera, se podrá determinar el voltaje y la corriente que deberá proveer la fuente.

Tabla 2.32. Voltajes y corrientes de operación a alimentar con la fuente.

Placa	Voltaje (V)	Corriente (mA)
Sensor de Presión	12 - 24	15
Electroválvula	10,8 - 13,2	208,3
Arduino Uno	7 - 12	460 máx

(Fuente: Propia)

De la tabla anterior se puede concluir que el voltaje requerido por los elementos es de 12V y la corriente que debe proveer es de 685 mA.

En el mercado se pudo encontrar una batería que tiene las especificaciones que se muestran en la tabla 2.33.

Tabla 2.33. Especificaciones generales de la batería. [31]

Característica	Descripción
Marca / Modelo	FirstPower / FP1220A
Voltaje Nominal (V)	12
Capacidad Máx. (Ah)	2
Capacidad Mín. (Ah)	1,3
Corriente máxima de carga (A)	6
Peso aproximado (kg)	0,75

La figura 2.68. indica la batería y su respectiva especificación provista por el fabricante.

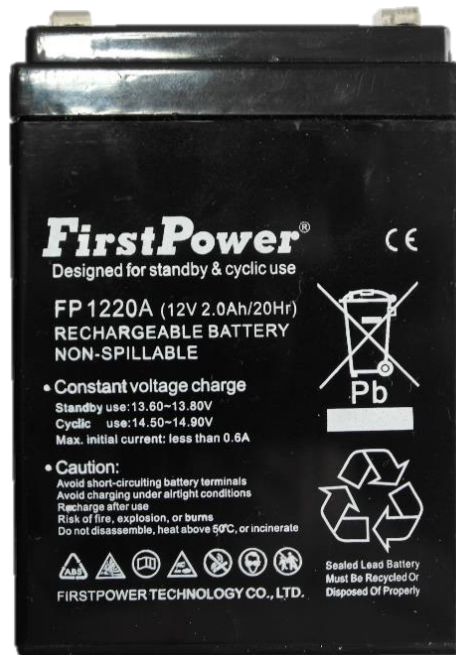


Figura 2.68. Batería.

(Fuente: Propia)

2.11.2. Integración de los elementos al sistema de control

Para la integración de los elementos, se debe identificar aquellos que trabajan con voltajes diferentes para agruparlos y finalmente alimentarlos. Los voltajes que se manejan en este proyecto son: 5V para los sensores que se alimentarán del Arduino Uno (Pantalla LCD 16x2 y Acelerómetro), 12V para los elementos que se alimentan directamente de la batería (Sensor de presión, Electroválvula, Arduino Uno). Sin embargo, la electroválvula al ser un actuador, requiere controlarse mediante la placa Arduino Uno que únicamente puede entregar un voltaje y amperaje limitados en comparación a lo requerido por las bobinas de la electroválvula. Por esta razón, es necesario un relay que pueda activarse con el voltaje provisto por la placa Arduino Uno para de esta manera ejercer el control de la electroválvula que es alimentada mediante un voltaje diferente.

Módulo de 2 Relay.

Este elemento está conformado por dos relay integrados en un mismo módulo, al que se le puede alimentar directamente desde la placa Arduino Uno. Cada relay controla una posición de la electroválvula (uno para la regeneración y otro para la aportación). Las características de este elemento se pueden observar en la tabla 2.34.

Tabla 2.34. Especificaciones generales del módulo de 2 relay. [32]

Característica	Descripción
Marca	Handson Technology
Tipo	Opto Aislado
Voltaje Nominal (V)	5
Corriente Máx. de la carga (A)	10
Voltaje Máx. de la carga (VDC/VAC)	30 / 230
Medias (mm)	50x38,5

En la figura 2.69. se aprecia el módulo completo en el que la alimentación por parte de la placa de control se realiza por la parte derecha, en los pines GND, IN1, IN2 y VCC; por la parte izquierda se tiene el circuito de control de la electroválvula.



Figura 2.69. Módulo de dos relay.

(Fuente: Propia)

Diagrama de conexionado.

La interconexión entre los elementos del sistema de control y la placa de control se puede realizar de manera indistinta con la precaución de conectar los pines digitales y análogos en su respectivo sector. Para el proyecto se indica la figura 2.70. que representa el diagrama de conexionado de todos los elementos que el sistema de control requiere.

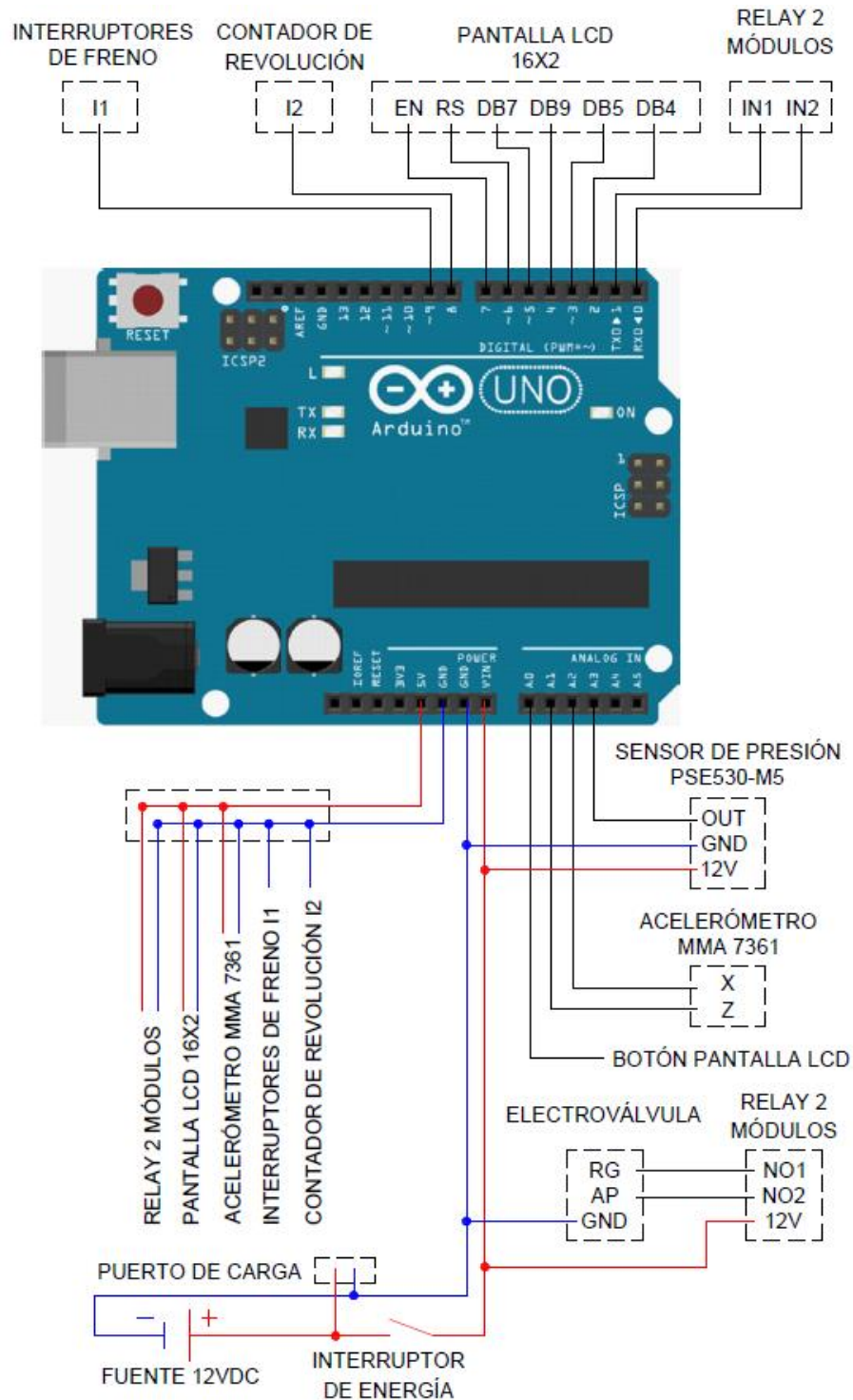


Figura 2.70. Diagrama de conexionado.

(Fuente: Propia)

En el diagrama de conexionado se pueden distinguir tres sectores. En el sector superior de la figura se encuentran las conexiones digitales hacia los elementos que lo requieren. En la parte inferior izquierda se encuentra el sector de abastecimiento de energía eléctrica de 5V hacia los sensores. Finalmente, en la parte inferior derecha se encuentra la alimentación

desde la fuente de 12V a la placa Arduino Uno, a la electroválvula y al sensor de presión, y las conexiones analógicas del acelerómetro y el sensor de presión.

2.12. Programación

Para realizar la programación del funcionamiento del sistema de control se tomará como base el diagrama de flujo de la figura 3.2. que tiene que ver con la actuación de la electroválvula en función del movimiento de la bicicleta y del ángulo de inclinación registrado. Por otra parte se debe considerar que la pantalla desplegará en todo momento la información que le permitan al usuario conocer ciertos datos de importancia tales como: la velocidad instantánea, distancia recorrida, ángulo de inclinación de la bicicleta, presión en el reservorio e inclusive tiempo transcurrido.

2.12.1. Arduino IDE

Para introducir el código de la programación en la placa Arduino Uno, se requiere de la instalación del IDE (Integrated Development Environment) que traducido quiere decir Entorno de Desarrollo Integrado, en el que se escribe el código que define lo que realizará el sistema de control. El lenguaje que se utiliza es C/C++ aunque existen funciones especializadas que se utilizan para la programación de la placa.

2.12.2. Código del programa

En el Anexo VIII se presenta la programación empleada para que el sistema de control funcione de acuerdo a la ingeniería de detalle desarrollada. El código incluye la descripción de la función que cumpla cada línea para que se pueda identificar específicamente alguna parte de interés. Estas descripciones se encuentran seguidas de los caracteres “//” (doble slash) pues de esta manera el programa sabe que lo que venga a continuación de los caracteres debe ser descartado pues estas descripciones son de ayuda para el programador.

Adicionalmente, en programa se insertó el título que corresponde al conjunto de funciones que maneja algún parámetro de la bicicleta. A continuación se presenta un ejemplo del texto del código de programación para que se interprete de mejor manera el Anexo VIII.

```
// CONTADOR DE REVOLUCIONES.
if (digitalRead(I1) == LOW) { // Indica si el interruptor del conteo de
//revoluciones se ha activado.
    B = 1; // Asigna el valor a la variable indicada.
    C = 0; // Asigna el valor a la variable indicada.
```

```

}
if (digitalRead(I1) == HIGH) { // Indica si el interruptor del conteo de
//revoluciones se ha desactivado.
    C = 1; // Asigna el valor a la variable indicada.
}

```

2.13. Construcción y Montaje

Para la construcción del sistema de control, se empleó el diseño virtual del capítulo anterior para obtener las medidas apropiadas del lugar en donde el sistema pueda ser ubicado. Se determinó que todo el sistema debe estar en una caja, lo más pequeña posible, en la que se puedan integrar todos los elementos y que no interfiera con el manejo del usuario. Con estas consideraciones, se propone la fabricación de una caja que contenga el sistema de control y que de la misma puedan salir los cables de comunicación y energía de los elementos que requieren incorporarse en los distintos lugares de la bicicleta. La ubicación de la caja se define en el espacio que forma el triángulo del marco de la bicicleta, en sentido vertical, tal como muestra la figura 2.71.



Figura 2.71. Ubicación del sistema de control.

(Fuente: Propia)

2.13.1. Integración de los elementos en la caja de control

En la caja se incorporarán los elementos que, debido a su función, no requieren instalarse en lugares lejanos al lugar elegido. En la caja estarán ubicados: la placa Arduino Uno, la batería, el acelerómetro, el módulo de dos relay y el interruptor de energía. La figura 2.72. muestra la integración de los elementos en la caja de control.



Figura 2.72. Caja de control y sus elementos.
(Fuente: Propia)

2.13.2. Pantalla LCD 16x2

Para el montaje del módulo de la pantalla se llevan las conexiones de energía y datos mediante un cable UTP desde la caja de control hacia el volante. Se elaboró una caja de acrílico que cubra y proteja la pantalla. La figura 2.73. muestra la caja elaborada, con la pantalla y los dos interruptores correspondientes a cada freno.



Figura 2.73. Caja de la pantalla LCD.
(Fuente: Propia)

3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez terminadas las fases de diseño y acoplamiento de los diferentes subsistemas del sistema neumático regenerativo, se procede a evaluar su funcionamiento.

La bicicleta y el acoplamiento deben ser probados bajo tres características: “Regeneración, Aportación y Control”. Estas características se han definido por su funcionalidad, es decir, cada una puede ser probada independientemente con el fin de que los resultados sean palpables y concluyentes.

3.1. Protocolo de Pruebas.

Para verificar el funcionamiento correcto del acoplamiento neumático, se plantea la realización de dos tipos de pruebas: una “Prueba en vacío” y otra “Prueba con carga”. La prueba en vacío se ejecuta con la bicicleta en reposo, en la que se chequean los sensores, actuadores y partes incorporados en el acoplamiento neumático. Por otra parte, la prueba con carga se efectúa recorriendo 3 veces por el mismo trayecto, el mismo que debe favorecer las condiciones para el análisis de las características funcionales antes mencionadas.

En los dos tipos de pruebas se tomarán los datos asociados a los sensores incorporados en el sistema neumático regenerativo mediante la ayuda de una tarjeta SD que se adaptará temporalmente al sistema de control. En la tarjeta SD se registrarán todos los datos digitales o analógicos que puedan proporcionar los diferentes sensores. Se registrarán también los datos que, mediante la programación del módulo de control, se derivan de la lectura de los sensores como, por ejemplo, la distancia, la velocidad, la presión, etc.

3.1.1. Prueba de vacío

Esta prueba consiste en el chequeo o verificación funcional de todos los componentes de los diferentes sistemas que componen el acoplamiento neumático. Se realiza con la bicicleta en reposo, montada sobre un soporte que permite acceder a cada uno de los subsistemas que componen el acoplamiento neumático.

La tabla 3.1. indica en la primera columna el sistema del ítem evaluado; en la segunda se indica el elemento evaluado; en la tercera, la operación realizada y finalmente en la cuarta columna se tiene la verificación.

Tabla 3.1. Lista de verificación de la prueba de vacío.

Subsistema	Elemento	Operación Realizada	Estado
Neumático	Reservorio Mangueras	Hermeticidad. Presión: 80 psi / 5.5 bar. Tiempo: 30 minutos.	Verifica
	Motor neumático	Rotación del eje. Presión: 80 psi / 5.5 bar.	Verifica
	Válvula de alivio	Presurización. Presión de alivio: 90 psi / 6.2 bar.	Verifica
	Electroválvula	Actuación de las dos posiciones. Voltaje: 12 vdc sobre los terminales.	Verifica
Transmisión	Cadena Catarinas	Alineación y acoplamiento correctos entre estos elementos. Alternabilidad de la cadena entre la catarina motriz y la neutra.	Verifica
Control	Sensor de presión	La presión en el indicador en la pantalla cambia con la variación de la presión en el reservorio.	Verifica
	Sensor magnético	Aumento de la distancia en el indicador de la pantalla a medida que la rueda delantera gira.	Verifica
	Acelerómetro	Indica si la bicicleta sube o baja en el indicador de la pantalla.	Verifica

(Fuente: Propia)

Estas actividades garantizan que las pruebas de carga (que se desarrolla en la siguiente sección), sean confiables, seguras y que el registro de los datos del trayecto a recorrer sea analizado de una manera más eficiente, debido a la programación y el empleo de la tarjeta SD en la que se introducen los valores de los sensores en tiempo real.

3.1.2. Prueba con carga

La prueba con carga consiste en definir un trayecto que, al recorrerlo, permita la evaluación de las funciones del sistema neumático con regeneración. Por lo tanto, se definirá un trayecto que presente al menos un descenso y un ascenso para que se ejecuten los procesos de regeneración y aportación. Se debe notar que la evaluación del “sistema de control” se encuentra implícita en los procesos mencionados debido a que todos los datos a recopilar se registran mediante este sistema.

El proceso de aportación se ejecutará mediante la energía propia de la regeneración y también por la carga de aire comprimido mediante una fuente externa.

3.1.2.1. Definición del trayecto

El trayecto elegido se muestra en la figura 3.1. Se puede ver que el punto de partida y el punto de llegada es el mismo debido a que la partida representa el punto más alto del recorrido con lo que se podrá efectuar la regeneración para posteriormente evaluar la aportación al momento de llegar.

El trayecto seleccionado será recorrido por tres ocasiones, todas en condiciones similares (tránsito vehicular y condiciones climáticas).



Figura 3.1. Trayecto para la prueba con carga. [33]

Comienza en la calle Fray Leonardo Murialdo, teniendo como punto de salida la intersección con la Av. 6 de diciembre. Gira a la izquierda por la calle Julio Teodoro Salem (una cuadra antes de llegar a la Av. 10 de Agosto) y luego gira a la derecha por la calle Nicolás Urquiola. Posteriormente se llega a la Av. 10 de Agosto para finalmente subir con la ayuda de la aportación. En los resultados se indicará adecuadamente los intervalos de aportación mediante regeneración o por carga de fuente externa.

3.1.2.2. Datos del trayecto

Mediante una altimetría mostrada en la figura 3.2. se podrá apreciar la diferencia de alturas que se tendrá entre el nivel más alto y el más bajo, así como la distancia del trayecto.

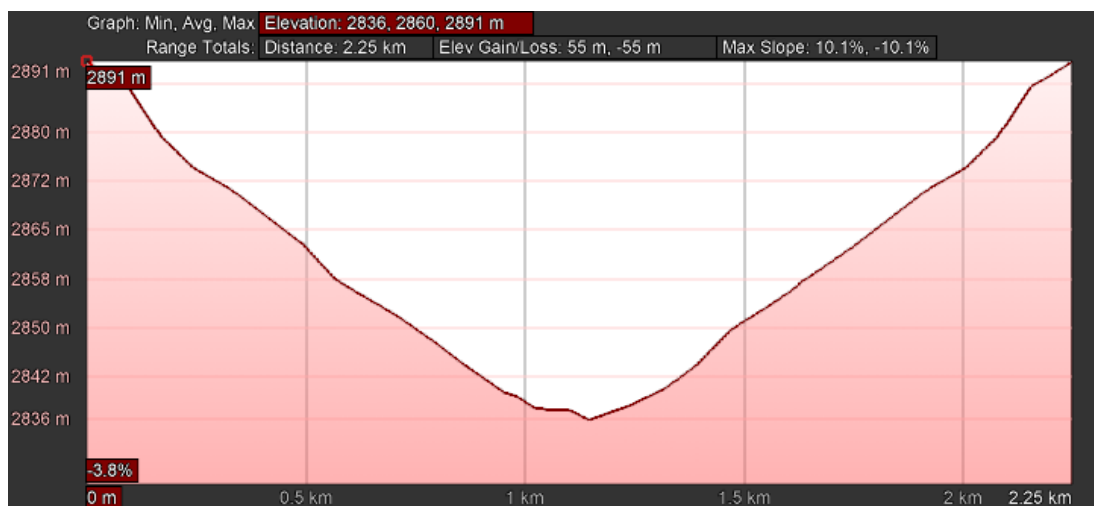


Figura 3.2. Altimetría del trayecto. [33]

De la gráfica mostrada anteriormente tiene que la distancia a recorrer es de 2.25 km y la diferencia de alturas entre el punto más alto y el más bajo es de 55 m.

3.1.2.3. Datos del conjunto usuario - bicicleta

En la tabla 3.2. se indican algunos datos del conjunto usuario – bicicleta como son los pesos (usuario, bicicleta y sistema neumático individual) y la capacidad del reservorio.

Tabla 3.2. Datos del conjunto usuario - bicicleta.

Usuario [kg]	Bicicleta [kg]	Sistema neumático [kg]	PESO TOTAL [kg]	Capacidad del reservorio [l]
88.6	16,0	5,0	109,6	21

(Fuente: Propia)

3.1.2.4. Variables a medir

Las variables que se desean medir resultan de la característica particular de cada proceso. Por ejemplo, en el proceso de regeneración se desea conocer la evolución de la presión respecto del tiempo o de la velocidad. A continuación se muestra la tabla 3.3. en la que se indica la variable que se desea medir, el sensor o instrumento con el que se medirá y la importancia de medir dicha variable.

Tabla 3.3. Variables a medir en la prueba con carga.

Variable	Sensor / Instrumento	Importancia
Distancia	Sensor de revoluciones magnético	<ul style="list-style-type: none">• Información para el usuario.• Análisis de resultados.
Tiempo	Módulo Arduino	<ul style="list-style-type: none">• Información para el usuario. (Obtención de la velocidad instantánea).• Análisis de resultados.
Presión	Sensor de presión	<ul style="list-style-type: none">• Información para el usuario.• Análisis de resultados.
Inclinación (Ascenso o Descenso)	Acelerómetro	<ul style="list-style-type: none">• Información para el usuario.

(Fuente: Propia)

De las variables medidas se pueden realizar cálculos para obtener otras variables, como por ejemplo la velocidad instantánea.

3.1.2.5. Recopilación de datos

De manera idéntica a lo realizado en la prueba en vacío, en esta prueba se emplearán los sensores incorporados en la bicicleta para poder medir y extraer los valores de las variables que se requieren para cada caso mediante la programación y la tarjeta SD.

Los datos serán recopilados cada segundo para tener una mejor trazabilidad de lo que acontece en el trayecto. Además, estos datos se indicarán en el anexo IX y serán graficados en el análisis de resultados.

Definidas las variables que se desean medir y los parámetros para recopilar los datos, se procede con el desarrollo de las pruebas para cada proceso.

3.2. Resultados y Análisis de Resultados

Se mostrarán los resultados obtenidos de las tres pruebas realizadas y al final se realizará el análisis de los resultados, tomando en cuenta los valores y las gráficas de las tres pruebas para luego hacer una comparación que permita la visualización de determinados hallazgos.

3.2.1. Prueba 1

A continuación, en la tabla 3.4. se muestran los datos obtenidos de la primera prueba. Los datos se encuentran representados cada 20 segundos debido a la cantidad de datos recopilados. Sin embargo, en el anexo IX se podrán visualizar todos los datos cada segundo.

Tabla 3.4. Datos prueba 1.

Tiempo [s]	Presión [psi]	V [km/h]
0	0,0	0,0
20	2,9	12,1
40	5,8	16,2
60	7,6	16,1
80	9,1	16,9
100	10,5	16,6
120	12,7	22,5
140	13,4	20,3
160	15,2	18,6
180	15,6	18,2
200	15,6	18,5
220	15,6	13,3
240	15,6	12,8
260	8,7	12,0
280	9,1	11,2
300	7,6	3,3
320	7,6	0,0

340	7,6	0,0
360	36,6	0,0
380	61,3	0,0
400	65,6	0,0
420	64,5	9,3
440	63,8	12,0
460	33,7	12,2
480	13,4	10,5
500	8,7	10,8
520	8,7	10,1
540	8,7	8,8
560	8,7	7,9
580	8,7	8,2
600	8,7	7,2
620	8,3	6,2
640	8,3	7,1
660	8,3	7,4
680	8,7	6,9
700	8,3	7,8
720	8,3	7,1
740	8,3	6,6
760	8,3	6,7
780	8,7	7,0
800	8,3	1,7
820	8,7	0,6

(Fuente: Propia)

La gráfica representada mediante la figura 3.3 indica el desarrollo de la presión y la rapidez a lo largo del tiempo.

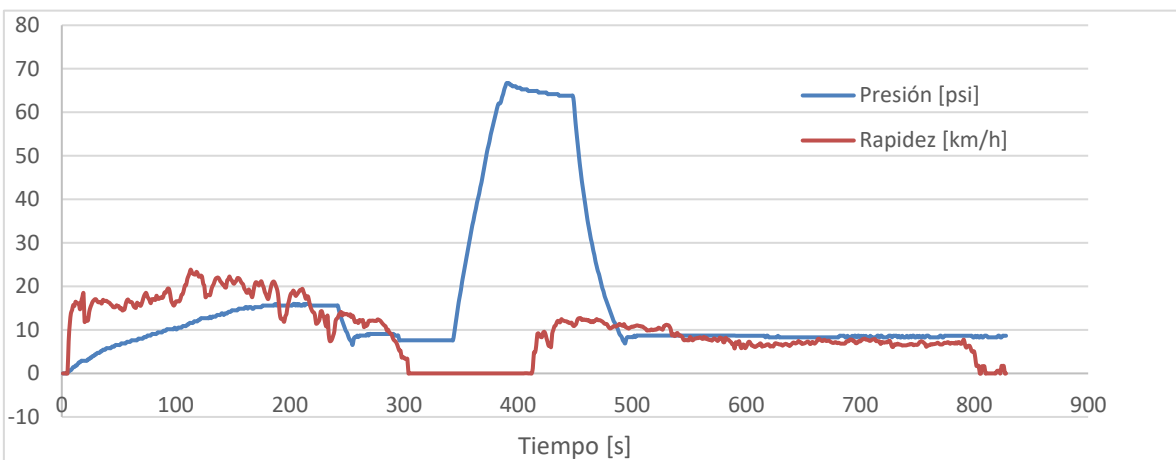


Figura 3.3. Gráfica Presión y Rapidez vs. Tiempo para la prueba 1.

(Fuente: Propia)

3.2.2. Prueba 2

A continuación, en la tabla 3.5. se muestran los datos obtenidos de la segunda prueba. recopilados. Sin embargo, en el anexo IX se podrán visualizar todos los datos cada segundo.

Tabla 3.5. Datos prueba 2.

Tiempo [s]	Presión [psi]	V [km/h]
0	0,4	0,0
20	7,6	17,1
40	10,5	16,7
60	11,2	15,6
80	11,6	18,0
100	14,1	18,5
120	14,9	22,8
140	15,6	20,7
160	15,2	22,4
180	16,0	20,2
200	16,0	21,2
220	16,7	20,7
240	9,1	15,9
260	10,5	20,6
280	11,6	17,3
300	12,3	16,2
320	12,0	13,7
340	12,0	14,4
360	30,8	0,0
380	49,0	0,0
400	62,7	0,0
420	62,5	7,2
440	61,9	0,0
460	52,2	12,9
480	21,0	12,9
500	8,0	5,5
520	7,3	8,7
540	7,6	9,3
560	7,6	8,4
580	7,7	4,7
600	7,7	5,7
620	7,7	4,7
640	7,7	3,8
660	7,7	4,7

680	7,3	4,5
700	7,3	5,1
720	7,3	5,1
740	7,7	5,5
760	7,7	5,2
780	7,3	4,4
800	7,7	4,4
820	7,7	4,8

(Fuente: Propia)

La gráfica representada mediante la figura 3.4 indica el desarrollo de la presión y la rapidez a lo largo del tiempo.

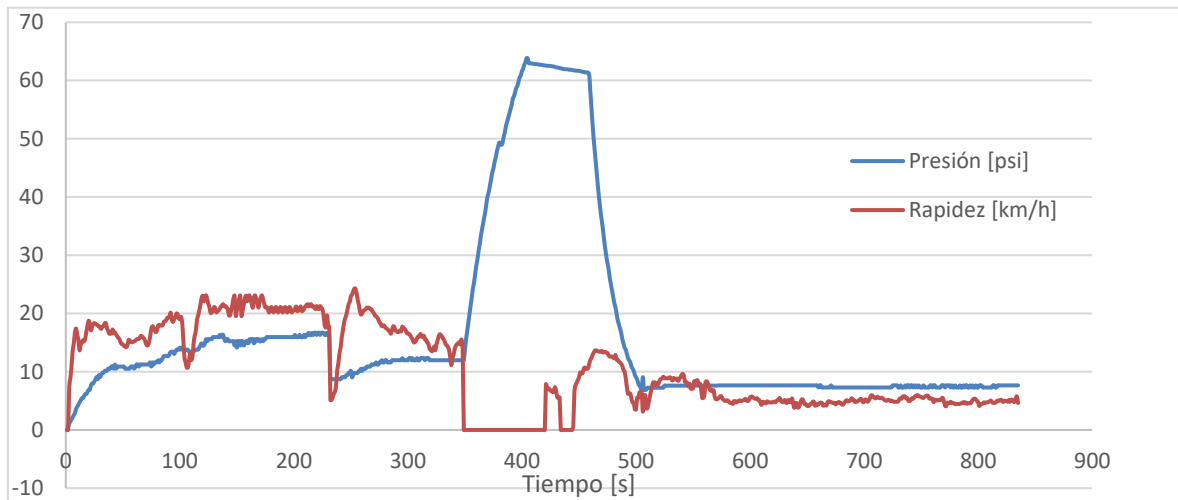


Figura 3.4. Gráfica Presión y Rapidez vs. Tiempo para la prueba 2.

(Fuente: Propia)

3.2.3. Prueba 3

A continuación, en la tabla 3.6. se muestran los datos obtenidos de la tercera prueba. recopilados. Sin embargo, en el anexo IX se podrán visualizar todos los datos cada segundo.

Tabla 3.6. Datos prueba 3.

Tiempo [s]	Presión [psi]	V [km/h]
0	0,4	0,0
20	5,4	15,4
40	11,2	16,0
60	10,9	13,3

80	12,0	18,4
100	14,1	18,4
120	15,6	21,0
140	16,3	20,2
160	16,7	20,0
180	17,1	19,3
200	16,7	18,6
220	15,6	10,6
240	14,1	11,5
260	7,3	16,7
280	10,9	16,2
300	7,6	6,3
320	7,6	5,5
340	7,6	0,0
360	29,7	0,0
380	57,3	0,0
400	63,0	0,0
420	62,0	6,0
440	48,2	11,8
460	19,2	12,3
480	9,1	8,9
500	9,8	9,5
520	7,6	6,5
540	7,6	6,6
560	7,6	8,2
580	7,6	7,5
600	7,6	6,2
620	7,3	7,6
640	7,3	8,1
660	7,3	7,8
680	7,3	8,3
700	7,3	8,9
720	7,3	8,0
740	7,3	8,4
760	6,9	5,8
780	6,9	7,4
800	6,9	7,3
820	6,9	0,0

(Fuente: Propia)

La gráfica representada mediante la figura 3.5 indica el desarrollo de la presión y la rapidez a lo largo del tiempo.

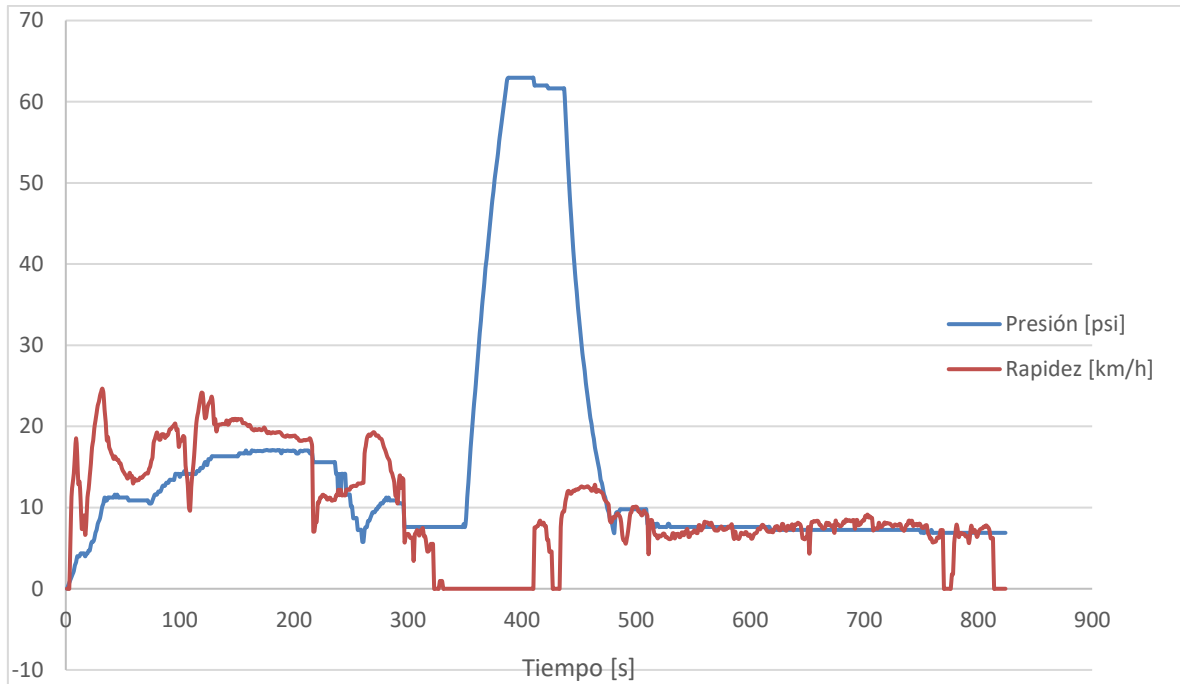


Figura 3.5. Gráfica Presión y Rapidez vs. Tiempo para la prueba 3.
(Fuente: Propia)

3.2.4. Análisis de resultados

Para ver los resultados de mejor manera, se procederá a incorporar el desarrollo de las presiones de las tres pruebas en la figura 3.6.

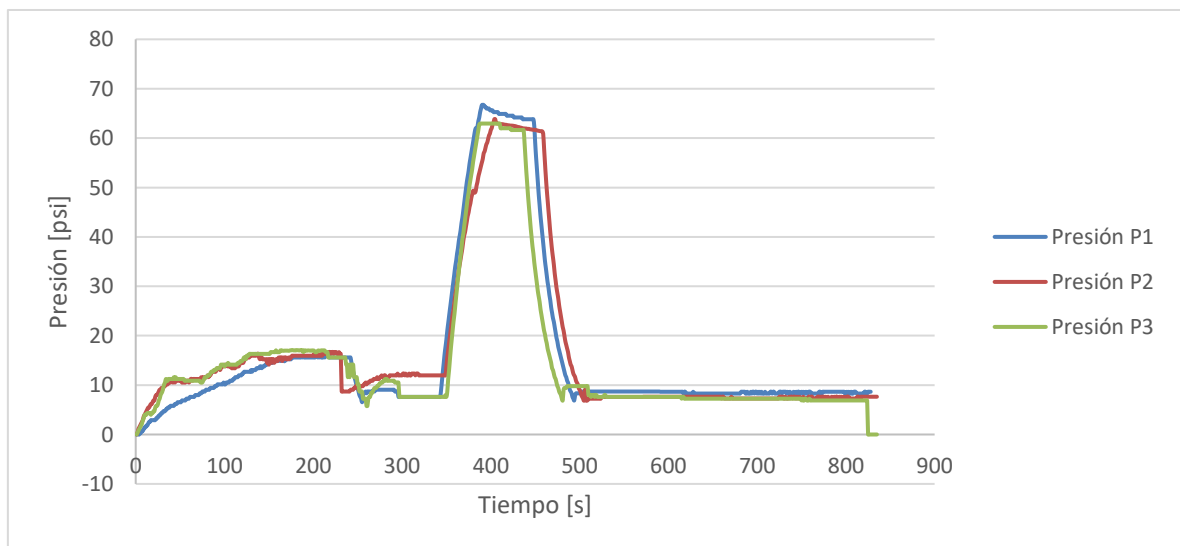


Figura 3.6. Gráfica Presión vs. Tiempo para las tres pruebas.
(Fuente: Propia)

Se puede notar que las gráficas son similares. Se realiza la distinción de tres sectores: Antes del pico de presión (generado por la carga de aire comprimido mediante una fuente externa), durante el pico y después del pico.

Durante los primeros 350 segundos (antes del pico de presión) se puede ver que la presión de regeneración llega entre los 16 y 18 psi. Aproximadamente en el segundo 230 existe una baja presión. Esto se debe a que ejecutó la aportación sobre la subida de la Av. 10 de Agosto. La ayuda por parte de la aportación es perceptible, sin embargo, la bicicleta también puede abastecerse de aire comprimido mediante algún medio externo. En este sentido, el intervalo entre el segundo 350 y 450, indica la recarga del reservorio hasta aproximadamente una presión de 65 psi. Esta carga fue realizada en la gasolinería Petroecuador ubicada entre las calles Murialdo y Urquiola. Luego, se aplica la aportación que para las tres pruebas se tiene una descarga progresiva y similar. El tiempo de duración de la aportación fue aproximadamente de 50 segundos, teniendo una sensación de apoyo muy notoria en la subida.

En la figura 3.7. se tiene la gráfica de la rapidez vs tiempo para las tres pruebas. Se puede notar que desde el segundo 450 que prácticamente indica el inicio de la aportación, existe un límite de aproximadamente 12 km/h y luego decrece hasta igualarse a una velocidad promedio de 8 km/h.

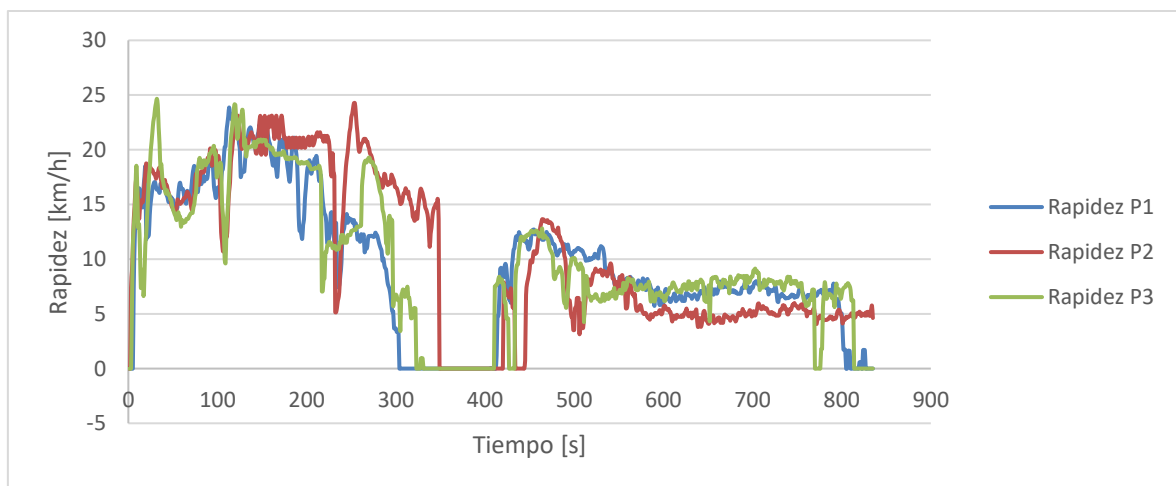


Figura 3.7. Gráfica Rapidez vs. Tiempo para las tres pruebas.

(Fuente: Propia)

Por otra parte, en la figura 3.8. se han identificado los sectores (A, B, C, D, E y F) a lo largo de la altimetría para representar el proceso (regeneración, aportación o neutro) bajo el cual se recorrió dicho sector. Debido a que las curvas de presión y rapidez vs tiempo son similares, la información representada en la figura es típica para el trayecto recorrido. Los

valores de distancia recorrida, presión inicial y presión final, son promedio de los obtenidos en las tres pruebas.

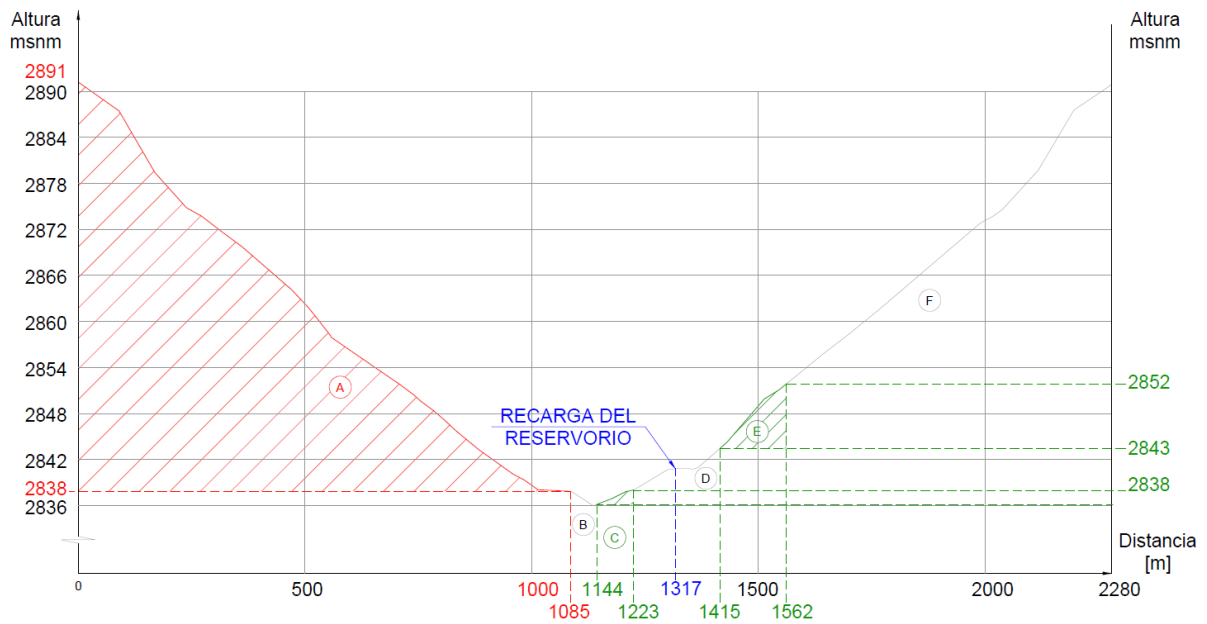


Figura 3.8. Altimetría del trayecto.
(Fuente: Propia)

La tabla 3.7. muestra la información procesada a partir de la figura 3.8. Se debe notar que en el sector D se tiene la recarga del reservorio mediante una fuente externa.

Tabla 3.7. Información procesada a partir de la figura 3.8.

Sector	A	B	C	D	E	F
Proceso	Regeneración	Neutro	Aportación	Neutro	Aportación	Neutro
Diferencia de Altura, [m]	53	2	2	5	9	39
Distancia Recorrida, [m]	1085	59	79	192	147	718
Inclinación Promedio	-2,8°	-1,9°	1,5°	1,5°	3,5°	3,1°
Presión Ini, [psi]	0	16	16	6	63	6
Presión Fin,[psi]	16	16	6	63	6	6

(Fuente: Propia)

De la tabla 3.7 se puede ver que la aportación ejecutada en el sector E, representa el ascenso con mayor pendiente de todo el trayecto. Sin embargo, de acuerdo a la figura 3.7., al aplicar la aportación se logra distinguir un incremento de la velocidad que es característico del funcionamiento adecuado de este proceso.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones

- El conjunto acoplado a la bicicleta permite la regeneración neumática mediante el motor de paletas, por lo que sirve para transformar la energía desperdiciada en el frenado de un descenso.
- El volumen del reservorio puede adaptarse para almacenar aire tanto de la regeneración como de una fuente externa, haciendo que la bicicleta tenga la función de regenerar o de ser recargada en cualquier lugar que provea aire comprimido.
- La integración del sistema de control se probó a lo largo de las tres pruebas de acuerdo a los procesos realizados y se observó que es un respaldo importante para el usuario a la hora administrar la carga y descarga del reservorio, evitando las distracciones que podrían existir en un proceso manual.
- La bicicleta con el acoplamiento neumático presenta la ventaja de que se puede cargar en cualquier gasolinera o vulcanizadora en un tiempo corto y a presiones que permitirían cierto confort al aplicar la aportación en un ascenso, ampliando su uso a personas que, por distintas condiciones, no deban hacer mayor esfuerzo.

4.2. Recomendaciones

- Para un proceso de regeneración que alcance mayores presiones de carga, se sugiere contemplar el empleo de un compresor de pistones debido a que el motor de paletas tiene limitaciones tecnológicas al momento de efectuar la compresión de aire.
- Es necesario integrar un embrague que permita alternar entre un estado libre y acoplado para la interacción entre los procesos de regeneración/aportación y el neutro.

- Para brindar una mayor seguridad al usuario, se debe plantear un reservorio que sea de un material más rígido, pero a su vez liviano.
- El conjunto acoplado puede llegar a ser autónomo si se introduce un dinamo que recargue la batería interna con la que funciona el sistema de control.

Referencias Bibliográficas.

- [1] Secretaría de Movilidad, Diagnóstico de movilidad en el D.M. de Quito para el plan Metropolitano de desarrollo territorial, Quito, 2014.
- [2] Empresa Municipal de Movilidad y Obras Públicas, Plan Maestro de Movilidad del D.M. de Quito 2009-2025, Quito, 2009.
- [3] BiciQuito, [En línea]. Available: www.biciquito.gob.ec.
- [4] El Comercio, [En línea]. Available: <http://www.elcomercio.com/actualidad/usuarios-bicicletas-electricas-quito-biciquito.html>.
- [5] Municipio del D.M. de Quito - Secretaría de Movilidad, Junio 2011. [En línea]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjCjoDI88nSAhUDkZAKHcVvA8oQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.terraecuador.net%2Fdocumentos%2Flineamientos_biciq_borrador.pdf&usg=AFQjCNGtW6jPNVUmYHIYBz0Gp7RIIUyLeg&sig2=m_.
- [6] ANDES, 7 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.andes.info.ec/es/noticias/bicicleta-electrica-alternativa-movilidad-quito-audio.html>.
- [7] Soluciones Tecnológicas Sustentables, «STS Rosario,» [En línea]. Available: <http://rosarioenbici.com/la-bicicleta-sus-partes-y-accesorios/>.
- [8] Ciclismo Urbano, «Estadísticas,» [En línea]. Available: <http://www.ciclismourbano.org/estadisticas/>.
- [9] Comisión Europea, En bici, hacia ciudades sin malos humos, Primera ed., Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, 2000.
- [10] G. Aragón, A. Canales y A. León, Introducción a la Potencia Fluida, Primera ed., Barcelona: REVERTÉ, 2014.
- [11] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Termodinámica, Quinta ed., México D.F.: Mc Graw Hill, 2011.
- [12] Energy EV, «¿Qué es y como funciona un freno regenerativo?,» [En línea]. Available: <http://energyev.com/que-es-y-como-funciona-el-frenado-regenerativo/>.
- [13] R. L. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, Cuarta ed., México D.F.: Pearson, 2006.
- [14] F. P. Beer, E. R. Johnston y P. J. Cornwell, Mecánica Vectorial para Ingenieros Dinámica, Décima ed., México D.F.: Mc Graw Hill, 2011.
- [15] P. Navarro, La Ingeniería de la bicicleta, Primera ed., Madrid: Fundación ESTEYCO, 2010.
- [16] D. H. Myszka, Máquinas y mecanismos, Cuarta ed., México: Pearson, 2012.

- [17] R. Budynas y N. Keith, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Octava ed., México: Mc Graw-Hill, 2008.
- [18] A. Barber, Pneumatic Handbook, Octava ed., Elsevier Science & Technology Books, 1997.
- [19] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Quinta ed., Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [20] R. Hernández Graviño, Introducción a los sistemas de control, Primera ed., México: Pearson, 2010.
- [21] E. INDUSTRIA, «Plataformas de Desarrollo basadas en Microcontroladores,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1539&edi=80>.
- [22] Arduino, «Products,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [23] «Topographic-Map,» [En línea]. Available: <http://es-ec.topographic-map.com/places/Quito-988023/>.
- [24] AIRTAC, «Airtac product catalog».
- [25] A. Copco, «Atlas Copco Air Motor Catalog».
- [26] A. Electrix. [En línea]. Available: <http://www.apexelectrix.com/>.
- [27] S. Pneumatics. [En línea]. Available: <http://www.smc Pneumatics.com/pdfs/PSE.pdf>.
- [28] I. Studio. [En línea]. Available: ftp://imall.iteadstudio.com/IM120417018_Arduino_1602_LCD_Shield/DS_IM120417018_Arduino1602LCDShield.pdf.
- [29] Digilent.[En línea]. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/chipKIT-Uno32-RevC_rm.pdf.
- [30] Arduino. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [31] FirstPower. [En línea]. Available: www.efirstpower.com .
- [32] H. Technology. [En línea]. Available: <http://www.handsontec.com/dataspecs/2Ch-relay.pdf>.
- [33] G. Earth. [En línea].
- [34] L. A. Direct. [En línea]. Available: <https://library.automationdirect.com/pneumatic-circuit-symbols-explained/>.
- [35] Farnell, «<https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>,» [En línea].
- [36] J. L. Meriam y L. G. Kraige, Dinámica, Tercera ed., Barcelona: REVERTÉ S.A., 2002.
- [37] Wikipedia. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Neum%C3%A1tico_de_bicicleta.

- [38] 25kmh, «<http://www.25kmh.es/bicicletas-electricas.php>,» [En línea].
- [39] ABRA. [En línea]. Available: <https://abra-electronics.com/electromechanical/relays/relay-modules-shields/rm-2-two-channel-relay-module.html>.