



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

**FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE APERTURA  
Y CIERRE DE LAS PUERTAS DEL TREN LIGERO  
DE LA CDMX**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Josué Rodrigo Hernández Ruiz

**ASESOR DE TESIS**

M. en I. María de Lourdes Marín Emilio



Nezahualcóyotl, Edo. de México 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *DEDICATORIA*

*A mis queridos padres y hermanos, quienes me han brindado su incondicional apoyo y confianza durante toda mi vida y en especial en este proceso de estudios. Gracias por creer en mí y por ser mis mayores motivadores, este logro es también de ustedes. Les agradezco por todo su amor y sacrificio.*

*“Todo gran viaje comienza con un primer paso”*

*- Halo.*

## AGRADECIMIENTOS

Doy mis más sinceros agradecimientos al Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX por permitirme realizar mi servicio social en los talleres de mantenimiento del Tren Ligerero, en donde recibí todo el apoyo por parte del personal para desarrollarme de forma profesional y por compartir sus conocimientos, en especial al Tec. Rómulo Delgadillo Zamora quien fue mi supervisor y a todo el personal de mantenimiento, sin ustedes no hubiera podido realizar esta tesis.

Agradezco a la M. en I. María de Lourdes Marín Emilio, mi asesora de tesis, por su tiempo, dedicación y apoyo para desarrollar esta tesis.

Agradezco a mis sinodales, los Ingenieros, José Mariano Santana Colín, Joel García Zárraga, Rolando Mauricio Calderón Morales y al M. en C. Jorge Vázquez Cervantes; Quienes han hecho que este trabajo sea de calidad.

Y un agradecimiento a Evelin Ivon Torres Solís, quien durante toda mi formación académica y personal ha sido una extraordinaria guía y siempre me motivo a seguir adelante.

## ÍNDICE

NOMENCLATURA.....	1
RELACIÓN DE FIGURAS.....	4
RELACIÓN DE TABLAS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS GENERALES.....	15
1.1 Neumática.....	15
1.1.1 Características del aire comprimido.....	20
1.1.2. Neumática como energía.....	22
1.2. Válvulas neumáticas.....	22
1.2.1. Clasificación de las válvulas distribuidoras.....	23
1.3. Electroválvulas.....	29
1.3.1. Tipos de electroválvulas (Rodavigo, 2016).....	30
1.4. Cilindro neumático.....	31
1.4.1. Cilindro de simple y doble efecto.....	32
1.4.2. Amortiguamiento de los cilindros.....	33
1.4.3 Selección de un cilindro neumático (MiCRO, 2015).....	35
1.5. Compresor.....	45
1.5.1. Compresor de desplazamiento positivo tipo tornillo.....	46
1.5.2 Selección de compresor.....	48
1.6 Secador de aire.....	54
1.6.1 Secador de aire regenerativo.....	56
1.6.2 Selección de secador de aire.....	57
1.6.3 Unidad de mantenimiento FRL.....	59
CAPÍTULO 2. MECANISMO DE PUERTAS.....	61
2.1 Puertas de acceso a pasajeros.....	61
2.1.1. Características y operación de puertas.....	67
2.1.2 Control del sistema.....	69
2.2 Partes que conforman el mecanismo de puertas.....	72
2.2.1 Mecanismo de suspensión.....	72

2.2.2 Descripción del movimiento del mecanismo. ....	76
2.2.3 Componentes del mecanismo de puertas.....	77
<b>CAPÍTULO 3. ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA PARA ACCIONAR EL SISTEMA DE APERTURA Y CIERRE DE LAS PUERTAS.....</b>	<b>87</b>
3.1. Alimentación neumática desde el motocompresor al tanque principal y tubería de equilibrio. ....	88
3.1.1 Componentes del sistema de alimentación neumática. ....	88
3.1.2 Distribución neumática para la alimentación. ....	97
3.2. Alimentación neumática de tubería de equilibrio a equipo neumático de puertas de M1 y M2. ....	99
3.2.1. Elementos de distribución y accionamiento del mecanismo de puertas. ....	99
3.2.3 Alimentación neumática a sistema de puertas. ....	105
<b>CAPÍTULO 4. PUESTA EN MARCHA. ....</b>	<b>109</b>
4.1 Inicio del proceso de alimentación del sistema. ....	109
4.2. Control de puertas. ....	112
4.3 Accionamiento del mecanismo. ....	115
4.4. Vista del usuario. ....	117
<b>CAPÍTULO 5. MANTENIMIENTO. ....</b>	<b>119</b>
5.1 Tipos de mantenimiento que se realizan al material rodante (Delgadillo, 2021). ...	123
5.1.1. Mantenimiento a motocompresor.....	126
5.1.2. Secador de aire regenerativo. ....	128
5.1.3. Mantenimiento a electroválvulas.....	131
5.1.4. Mantenimiento a cilindro.....	133
5.1.5. Mantenimiento a mecanismo de puertas.....	133
<b>CONCLUSIÓN. ....</b>	<b>136</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>137</b>

## NOMENCLATURA.

$A_s$	-	Área de la sección transversal, [ $m^2$ ];
$A$	-	Área, [ $m^2$ ];
$A_a$	-	Área anular, [ $mm^2$ ];
$A_p$	-	Área del pistón, [ $mm^2$ ];
$A_v$	-	Área del vástago, [ $mm^2$ ];
C.T.U	-	Consumo total útil, [ $m^3/min$ ];
CDMX	-	Ciudad de México;
Con. Ut	-	Consumo útil, [ $l/min$ ];
$C_u$	-	Consumo unitario, [ $l/min$ ];
$C_p$	-	Capacidad calorífica a presión constante, [ $kJ/kg * K$ ];
$C_{pr}$	-	Factor de corrección por presión;
$C_t$	-	Factor de corrección por temperatura;
$C_{o_u}$	-	Coefficiente de utilización;
D	-	Diámetro del cilindro, [mm];
$D_p, D_v, D_a$	-	Diámetro del pistón, vástago y anular, [mm];
F	-	Fuerza, [N];
$F_a$	-	Fuerza de avance, [N];
$F_m$	-	Fuerza del muelle, [N];
$f_{max}$	-	Frecuencia máxima de carga, [ <i>ciclos/seg</i> ];
FRL	-	Filtro, Regulador, Lubricador;
$h_{coolant}$	-	Aumento específico de la entalpía del gas, [ $ft*lb_f/lb_m$ ];
$h_{gas}$	-	Aumento específico de la entalpía del gas, [ $ft*lb_f/lb_m$ ];
$h_r$	-	Entalpía real, [ $kJ/kg$ ];
$h_s$	-	Entalpía ideal, [ $kJ/kg$ ];
$H_{rel}$	-	Humedad relativa, [%];
K	-	Kelvin;
KP	-	Conmutador de puertas;
L	-	Requisito de aire para la fase de llenado, [ $l/ciclo\ de\ trabajo$ ];

M1	–	Motriz 1;
M2	–	Motriz 2;
$\dot{m}_{coolant}$	–	Flujo másico del refrigerante, $[lb_m/sec]$ ;
$\dot{m}_{gas}$	–	Flujo másico del gas, $[lb_m/sec]$ ;
N	–	Newton
n	–	Número de herramientas;
NA	–	Normalmente abierto;
NC	–	Normalmente cerrado;
P	–	Presión, $[Pa]$ ;
Pa	–	Pascal;
$P_{abs}$	–	Presión absoluta;
PCP	–	Presostato del compresor;
$P_s$	–	Presión de vapor saturado, $[mmHg]$ ;
$P_w$	–	Presión real de vapor, $[mmHg]$ ;
q	–	Caudal de aire durante la fase de vaciado, $[l/s]$ ;
$q_c$	–	Capacidad del compresor, $[l/s]$ ;
Q	–	Caudal, $[m^3/s]$ ;
$Q_c$	–	Caudal del compresor, $[N * m^3/min]$ ;
$Q_{out}$	–	Caudal de salida $[l/min]$ ;
$Q_s$	–	Caudal del secador, $[N * m^3/min]$ ;
S	–	Carrera de cilindro, $[mm]$ ;
SI	–	Sistema Internacional;
T	–	Temperatura, $[K]$ ;
$t_{off}$	–	Tiempo en descarga o en OFF, $[min]$ ;
t	–	Tiempo, $[s]$ ;
TE-06	–	Tren eléctrico modelo 2006;
TE-12	–	Tren eléctrico modelo 2012;
TE-90	–	Tren eléctrico modelo 90;
TE-95	–	Tren eléctrico modelo 95;

$t_{on}$	– Tiempo en carga o en ON, [ <i>min</i> ];
UPS	– Unidad Programable de Servicios;
V	– Volumen, [ <i>l</i> ];
V	– Volumen, [ $m^3$ ];
$\vec{V}_a$	– Velocidad de avance, [m/s];
$\vec{V}_r$	– Velocidad de retroceso, [m/s];
$\vec{V}$	– Velocidad del flujo, [m/s];
$W_c$	– Trabajo del compresor, [kJ/kg];
$W_{cr}$	– Trabajo real, [kJ/kg];
$W_{cs}$	– Trabajo ideal, [kJ/kg];
$(P_U - P_L)$	– Diferencia de presión ajustada entre carga y descarga, [ <i>bar</i> ];
$\beta$	– Relación de áreas;
$\eta$	– Eficiencia;
$\Delta h$	– Diferencia de entalpías específicas, [kJ/kg];
$^{\circ}C$	– Grado Celsius;

### ***Subíndice***

atm	– Atmósfera;
a	– Anular;
abs	– Absoluto;
r	– Retroceso;

## **RELACIÓN DE FIGURAS.**

Figura 1. Simbología del número de posiciones en válvulas neumáticas (Hernández, J. 2022).

Figura 2. Válvula de 3/2. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 136). Madrid: Paraninfo (2009).

Figura 3. Representación simbólica de conexiones. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 136).  
Madrid: Paraninfo (2009).

Figura 4. Válvulas de asiento: (a) bolas, (b) planos o (c) conos. Nicolás. N, Neumática  
práctica (p. 138). Madrid: Paraninfo (2009).

Figura 5. Válvulas de corredera. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 138). Madrid: Paraninfo  
(2009).

Figura 6. Tipos de accionamiento manual. (Hernández, J. 2022).

Figura 7. Tipos de accionamiento mecánico. (Hernández, J. 2022).

Figura 8. Accionamiento neumático. (Hernández, J. 2022).

Figura 9. Accionamiento electroneumático. (Hernández, J. 2022).

Figura 10. Cilindro neumático. Creus, S. Neumática e Hidráulica (p. 26). España: Marcombo,  
2007.

Figura 11. Cilindro con amortiguación delantera [Figura]. Nicolás, A. Neumática práctica (p.  
93). Madrid: Paraninfo, 2009.

Figura 12. Áreas de cilindro neumático. (Hernández, J. 2022).

Figura 13. Volumen de cilindros. (Hernández, J. 2022).

Figura 14. Velocidad de avance. (Hernández, J. 2022).

Figura 15. Velocidad de retroceso. (Hernández, J. 2022).

Figura 16. Actuación de la fuerza de avance. (Hernández, J. 2022).

Figura 17. Fuerza de retroceso. (Hernández, J. 2022).

Figura 18. Tornillo rotatorio típico. Hanlon, P. Compressor Handbook (p. 401). New York: McGraw Hill, 2001.

Figura 19. Unidad de mantenimiento (EVANS, 2017).

Figura 20. Un tren Ligero, compuesto de dos vagones. (Hernández, J. Fotografía tomada en el patio de pruebas del tren ligero, el día 25 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 21. Pórtico de articulación. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 22. Electroválvulas de apertura y cierre de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 23. Electroválvulas puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 24. Electroválvulas B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 25. Cilindro neumático. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 26. Modelos de cilindros neumáticos. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 31 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 27. Mecanismo de puertas montado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 28. Guía de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 1 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 29. Puerta de pasajeros. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 1 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 30. Selector puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 12 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 31. Cartero. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 14 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 32. Mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 33. Banco de pruebas de mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 34. Tornillo de paso contrario. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 35. Horquillas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 36. Perno prisionero. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 37. Seguidores de tornillo de paso contrario. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 38. Guía y reten de balines. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 39. Excéntrica. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 40. Partes del mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

- Figura 41. Regulación de excéntricas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 42. Detector de posición. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 43. Detector de puerta abierta. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 44. Tipos de electroválvulas. (Hernández, J. 2022).
- Figura 45. Accionamiento de las electroválvulas. (Hernández, J. 2022).
- Figura 46. Motocompresor de tipo tornillo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 21 de julio de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 47. Grupos principales del motocompresor. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 21 de julio de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 48. Partes del secador de aire regenerativo. (Hernández, J. 2022).
- Figura 49. Tanque de regeneración y electroválvula. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 50. Tanque principal de 250 litros. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).
- Figura 51. Alimentación neumática desde el motocompresor al tanque principal y tubería de equilibrio (Delgadillo, s.f).
- Figura 52. Conexión de trabajo de Electroválvula B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 53. Alimentación neumática a electroválvula. (Hernández, J. 2022).

Figura 54. Regulador de presión. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 28 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 55. Circuito neumático de la electroválvula. (Hernández, J. 2022).

Figura 56. Función de electroválvula como apertura de puertas. (Hernández, J. 2022).

Figura 57. Cilindro neumático. (Hernández, J. 2022).

Figura 58. Actuador en cierre de puertas. (Hernández, J. 2022).

Figura 59. Representación de la fase amortiguada. (Hernández, J. 2022).

Figura 60. Alimentación de tubería de equilibrio a sistema neumático de puertas de M1 y M2 (Delgadillo, s.f).

Figura 61. Componentes iniciales. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto y 3 de junio de 2022 respectivamente, Huipulco CDMX).

Figura 62. Electroválvulas y regulador de presión. (Hernández, J. 2022).

Figura 63. Conmutador de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 30 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 64. Selector apertura puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 18 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 65. Cilindro en posición de apertura. (Hernández, J. 2022).

Figura 66. Desplazamiento del seguidor de tornillo de paso contrario. (Hernández, J. 2022).

Figura 67. Accionamiento del seguidor contrario al cilindro. (Hernández, J. 2022).

Figura 68. Cierre del mecanismo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 69. Puertas abiertas y cerradas. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 31 de agosto y 17 de junio de 2022 respectivamente, Huipulco CDMX).

Figura 70. Banco de pruebas de motocompresor. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 23 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 71. Elementos de torre de filtrado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 72. Elementos torre de secado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 73. Mantenimiento a secador de aire regenerativo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 74. Mantenimiento a electroválvula B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Figura 75. Proceso de cardado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

## **RELACIÓN DE TABLAS.**

Tabla 2.1. Parámetros de operación del sistema de puertas.

## **INTRODUCCIÓN.**

El tren ligero es un medio de transporte no contaminante perteneciente a la Red de Servicio de transportes eléctricos de la CDMX cuyo servicio se inauguró el año de 1986 brindando un recorrido que va desde la terminal Taxqueña a Xochimilco.

El tren ligero también conocido como material rodante es un tren bidireccional conformado de dos carros motrices (motriz M1 y motriz M2), actualmente está integrado por un total de veinticuatro trenes. Los veinticuatro trenes se distribuyen de la siguiente forma: Doce trenes pertenecen al modelo TE-90, cuatro trenes al modelo TE-95, cuatro trenes al modelo TE-06, y cuatro trenes al modelo TE-12. La nomenclatura que se utiliza para referenciarlos significa que, TE es Tren Eléctrico y el número pertenece al modelo que es el año de fabricación.

Este tipo de trenes está integrado por diversos sistemas como lo son: el sistema de apertura y cierre de las puertas de pasajeros, el sistema de frenado, el sistema de suspensión, el sistema de tracción, entre otros.

En este trabajo se enfocará en el sistema de apertura y cierre de las puertas del tren ligero que permite el paso del pasajero del andén a el vagón y viceversa. Además, debe mantener al usuario seguro de algún movimiento que pueda provocar que caiga a las vías mientras el tren está en marcha, aunque esto último es casi imposible, ya que el tren cuenta con sensores y un micro switch en cada puerta que detectan la abertura y no le permite traccionar. Para el funcionamiento del sistema de las puertas del tren se divide en tres subsistemas que son: el eléctrico, el mecánico y el neumático. En este trabajo se enfocará en el análisis de los subsistemas que son el neumático y el mecánico. Ambos subsistemas en conjunto permiten la correcta operación del sistema de las puertas, por una parte, el subsistema neumático es el

encargado de generar la energía necesaria que será aprovechada por el subsistema mecánico como energía de trabajo para llevar a cabo su función.

Para el correcto funcionamiento del Tren Ligero se programan actividades de mantenimiento, con la finalidad que los trenes tengan óptimas condiciones de operación, fiabilidad y seguridad. Para esta actividad existe la Gerencia de Mantenimiento del Tren Ligero que se divide en dos subgerencias que son: La Subgerencia de Mantenimiento Eléctrico y Electrónico y la Subgerencia de Mantenimiento Mecánico, teniendo establecido un plan de mantenimiento que se realiza por períodos de tiempo o por el kilometraje recorrido de los trenes, y se basa originalmente en los manuales que proporcionan los fabricantes de los trenes y por la experiencia que se adquirió con el paso del tiempo (mejora continua).

Los tipos de mantenimiento que se dan al material rodante son tres: 1) Mantenimiento Preventivo Programado Menor, 2) Mantenimiento Preventivo Programado Mayor y 3) Mantenimiento Correctivo. Dentro del Mantenimiento Preventivo Programado Menor se dividen en tres tipos que son: Mantenimiento preventivo tipo “A” o revisión diaria, Mantenimiento preventivo tipo “B” o mantenimiento sistemático mensual y Mantenimiento preventivo tipo “C” o cíclico.

El apropiado mantenimiento dará fiabilidad en la operación del tren, además de diagnosticar algunas de las fallas en los componentes de los sistemas que lo integran y, permitirá optimizar el tiempo, el esfuerzo y los recursos económicos con los que cuenta la gerencia de mantenimiento.

Esta acción contribuirá a la misión del tren ligero la cual es “brindar a los usuarios una alternativa de transportación no contaminante, segura, confiable y oportuna, que satisfaga con eficiencia y de manera económica las necesidades de traslado hacia los diversos puntos que cubre la red en operación” (Servicio de Transportes Electricos, 2023).

## **OBJETIVOS.**

El objetivo general de esta tesis es analizar el funcionamiento del sistema de apertura y cierre de las puertas del tren ligero de la CDMX, y explicar el mantenimiento general de algunos componentes.

Los objetivos particulares son:

- Explicar los conceptos fundamentales de la neumática.
- Analizar los componentes y partes que integran el subsistema mecánico.
- Analizar los componentes que integran el subsistema neumático.
- Seleccionar algunos componentes que integran el subsistema neumático.
- Explicar los tipos de mantenimiento que se realizan al Tren Ligero.

La tesis se integra de cinco capítulos. En el primer capítulo se explican los conceptos fundamentales de la neumática y se describe el funcionamiento del compresor, el secador de aire regenerativo, las electroválvulas y el separador de aceite, además de algunos criterios para la selección de un compresor, el depósito de aire, el cilindro neumático y el secador de aire. En el capítulo dos, se analiza el tornillo de paso contrario, la horquilla, el perno prisionero, el seguidor de tornillo de paso contrario, las tuercas excéntricas, el cilindro neumático, y el sensor BKP que integra al mecanismo de puertas para describir su funcionamiento. En el capítulo tres, se analiza la distribución neumática desde su origen en el motocompresor, y el proceso de mantenimiento que se le da al aire con el filtro de aceite y el secador de aire regenerativo, para ser almacenado en un depósito de 250 L y ser distribuido al sistema de apertura y cierre de puertas de pasajeros del tren ligero. En el capítulo cuatro, se integran los componentes a los procesos involucrados en los capítulos dos

y tres para describir la secuencia completa de funcionamiento del sistema de apertura y cierre de las puertas. En el capítulo cinco, se describen los tipos de mantenimiento que se llevan a cabo en los talleres de Huipulco y Xochimilco al tren ligero, en particular al motocompresor, al cilindro de puertas, la electroválvula, el secador de aire regenerativo y el mecanismo de puertas. Finalmente, se presenta la conclusión y las referencias.

## **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS GENERALES.**

En el presente capítulo se explicarán los conceptos fundamentales de la neumática, con la finalidad de conocer su área de estudio, así como sus parámetros más importantes, con ello se explicará cómo funcionan algunos componentes neumáticos como lo son las válvulas, los cilindros neumáticos, el compresor, el secador de aire y la unidad de mantenimiento del aire comprimido. Además, se establecerán algunos criterios para la selección de un compresor, un cilindro neumático y un secador de aire.

### **1.1 NEUMÁTICA.**

Creus Sole, A (1978) señala que, desde la antigüedad, el hombre ha utilizado la neumática en diferentes ámbitos como el aprovechamiento de las corrientes naturales para la navegación y el accionamiento de molinos de viento (p. 9).

Festo Didáctico (1978) señala que, la neumática utiliza el aire comprimido como transmisor de energía para el control y la regulación de fuerzas en dispositivos y, que el término neumática proviene de la palabra griega “Pneuma” que significa aliento o sople (P.9).

Hay que tener en cuenta que la neumática no es la única forma de generar energía o de utilizarlo para generar trabajo, dependiendo del tipo de industria se pueden utilizar diferentes sistemas de transmisión de energía como son: mecánicos, hidráulicos, neumáticos y eléctricos. En la práctica, la elección de uno o varios de estos sistemas radica en diversas consideraciones como lo son factores técnicos, como la precisión, regularidad o repetitividad de un movimiento; a factores energéticos, como el consumo de caudal, energía o el rendimiento y características de la instalación; pero también a factores funcionales, como el mantenimiento, refacciones, sencillas de uso e implementación.

En los sistemas de aire comprimido con el empleo de compresores y sus respectivos tanques de almacenamiento y con el apoyo de actuadores neumáticos se puede obtener un trabajo controlado. Las ventajas de utilizar la neumática es “el bajo costo de sus componentes, su facilidad de diseño e implementación y el bajo par o la fuerza escasa que puede desarrollar a las bajas presiones con que trabaja (típico 6 bar) lo que constituye un factor de seguridad. Otras características favorables son el riesgo nulo de explosión, su conversión fácil al movimiento giratorio, así como al lineal, la posibilidad de transmitir energía a grandes distancias, una construcción y mantenimiento fáciles y la economía en las aplicaciones” (Creus, 2007, pág. 9).

De acuerdo con Festo Didáctico (1978) las magnitudes físicas que se utilizan en la neumática son: Longitud (m), masa (kg), tiempo (s), temperatura en Celsius o Kelvin (°C o K). Estas magnitudes físicas son de importancia ya que de ellas derivan las magnitudes más importantes de la neumática como son: presión, volumen, velocidad, fuerza y caudal (p. 10).

### ***Presión.***

Según (LEGO education, 2022; U. de Santiago de Chile, 2020) la fuerza que ejercen las moléculas de aire sobre una superficie en forma normal se le denomina presión y según la Ley de Pascal dice que “***Al ejercerse una presión sobre un fluido, esta se ejercerá con igual magnitud en todas las direcciones y en cada parte del fluido***”, esta cantidad de presión que ejercerá el aire dependerá de la cantidad de colisiones que se produzcan entre las partículas de aire y la superficie del contenedor, la presión generada sobre el aire lo mantiene comprimido, y en ese estado el aire almacena energía potencial, la cual puede ser aprovechada si se utiliza un circuito de flujo controlado para convertir la energía potencial en energía cinética y de esta forma accionar un sistema.

La presión se puede obtener al utilizar la ecuación (1)

$$P = \frac{F}{A} \quad \dots (1)$$

Donde:

$$P = \text{Presión} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F = \text{Fuerza} [N]$$

$$A = \text{Área} [m^2]$$

Cuando se quiere medir la presión dentro de un tanque o cilindro, lo que se está midiendo es la presión manométrica la cual puede ser monitoreada con un manómetro, pero no es la única presión ejercida ya que en todos los objetos siempre se está ejerciendo una presión atmosférica, por lo que es preciso mencionar que la presión manométrica es una presión que se encuentra por arriba de la presión atmosférica, mientras que cuando se obtienen presiones por debajo de la presión atmosférica se le conoce como presión de vacío y pueden ser monitoreadas con vacuómetros, entonces si lo que se quiere medir es la presión absoluta se debe emplear la siguiente ecuación (2):

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{atmósferica}} \quad \dots (2)$$

La presión en el Sistema Internacional (SI) es el Pascal (Pa), pero regularmente se utilizan las siguientes unidades:

- $\frac{N}{m^2} = Pa$
- $Bar = 10^5 Pa$
- $Patm = 1,01325 bar = 1,01325 * 10^5 bar$

- *Columna de mercurio* = 760 mm Hg = 1 atm
- $\frac{Kp}{cm^2} = 1,01972 \text{ bar} = 1,01972 * 10^5 \text{ bar}$

### ***Volumen.***

El volumen es el espacio que ocupa un cuerpo, el cual en el Sistema Internacional se mide en  $m^3$ , el volumen en los gases no tiene una forma definida por lo cual tienden a adoptar la forma del recipiente en donde se encuentran contenidos.

### ***Caudal.***

El caudal volumétrico o tasa de flujo de fluidos es, el volumen de fluido que pasa por una superficie dada por unidad de tiempo, y se puede representar como la ecuación (3) y (4).

$$Q = \frac{V}{t} \quad \dots (3)$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal} \left[ \frac{m^3}{s} \right].$$

$$V = \text{Volumen} \quad [m^3].$$

$$t = \text{tiempo} \quad [s].$$

$$Q = A * \vec{V} \quad \dots (4)$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal} \left[ \frac{m^3}{s} \right].$$

$$A_s = \text{Área de la sección transversal} \quad [m^2].$$

$\vec{V}$  = Velocidad del flujo  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

### ***Leyes de los gases***

Las leyes utilizadas usualmente en un sistema neumático de acuerdo con U. de Santiago de Chile (U. de Santiago de Chile, 2020) son: Ley de Boyle/Mariotte que establece que la presión de un gas en un recipiente cerrado, es inversamente proporcional al volumen del recipiente cuando la temperatura es constante, este enunciado se ve reflejado en la ecuación (5), la Ley de Gay-Lussac que establece que en una transformación isobárica (presión constante) la temperatura y el volumen varían directamente proporcional, este enunciado se ve reflejado en la ecuación (6) y la Ley de Charles establece que en una transformación isométrica (volumen constante) la presión y la temperatura varían directamente proporcional, este enunciado se ve reflejado en la ecuación (7).

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad \dots (5)$$

Donde:

$P_1$  = Presión 1 [Pa].

$V_1$  = Volumen 1 [l].

$P_2$  = Presión 2 [Pa].

$V_2$  = Volumen 2 [l].

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \dots (6)$$

Donde:

$V_1 = \text{Volumen 1 [l]}.$

$T_1 = \text{Temperatura 1 [K]}.$

$V_2 = \text{Volumen 2 [l]}.$

$T_2 = \text{Temperatura 2 [K]}.$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \dots (7)$$

Donde:

$P_1 = \text{Presión 1 [Pa]}.$

$T_1 = \text{Temperatura 1 [K]}.$

$P_2 = \text{Presión 2 [Pa]}.$

$T_2 = \text{Temperatura 2 [K]}.$

### 1.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL AIRE COMPRIMIDO.

Nicolás, A. (2009) en su libro neumática práctica menciona que el aire comprimido se extrae de la atmósfera y, este aire generalmente se trabaja con una presión de hasta 12 bar el cual no se recomienda trabajar a grandes distancias debido a las pérdidas en los racores y a las pérdidas de carga (p. 19). Otros factores para tomar en cuenta es que el aire neumático debe ser seco, sin agentes agresivos y contaminantes, así mismo libre de vapores de agua, y se puede almacenar en depósitos para evitar el continuo funcionamiento de los compresores y de esta forma alargar su vida útil.

Ahora bien, estudios (Festo Didáctico, 1978; Nicolás, 2009) mencionan que el aire se caracteriza por su elasticidad, fluidez y compresibilidad. La elasticidad permite que el aire al ser comprimido, la presión generada se reparta de igual forma sobre las paredes de un recipiente; La compresibilidad permite que el aire al ser sometido a presión es capaz de reducir su volumen en un determinado sistema si este se encuentra sellado; la fluidez permite que no haya apenas resistencia de sus partículas al movimiento cuando fluye.

No obstante, Nicolás, A. (2009) menciona que la característica esencial que más destaca es la compresibilidad, muchos sistemas ocupan esta característica por la capacidad del aire de almacenar energía potencial, la cual puede ser liberada en energía cinemática para accionar actuadores neumáticos, mecanismos que poseen motores neumáticos o para accionar bombas hidroneumáticas. Al someter a compresión el aire dentro de un cilindro este hará ceder al pistón el cual lo hará actuar como un resorte mecánico que fungirá como un elemento amortiguador, cuando el volumen este controlado sin ningún tipo de salida o en su defecto con un escape controlado. En algunos casos resulta negativa esta cualidad debido al retroceso del cilindro y a la imposibilidad de detenerlo cuando deja de ser alimentado bruscamente, el cual seguirá avanzando hasta que la fuerza de las cámaras se iguale o exista la presencia de algún tope mecánico que lo detenga (p. 19).

Otra característica de la neumática es que con solo estrangular el paso (ya sea bloqueándolo con un objeto o una válvula) es fácil de controlar el flujo, así mismo se pueden regular los esfuerzos en los elementos de trabajo controlando la presión del flujo como lo podría ser con un regulador de presión.

### 1.1.2. NEUMÁTICA COMO ENERGÍA.

La razón para usar la neumática o cualquier otro tipo de transmisión de energía en una máquina es, usar una fuente apropiada de potencia para la ejecución del trabajo. En la forma de aire comprimido, la energía se almacena y se distribuye en un estado potencial, cuando el aire se le permite convertir su energía potencial en energía cinética, el resultado es energía útil para el sistema neumático.

En los sistemas neumáticos la potencia proviene de un fluido, generalmente de un gas gracias a una de sus características esenciales como lo es la compresión, la cual se ocupa como medio para la transmisión de energía.

La transmisión de la fuerza se puede proporcionar ya sea por un sólido o un fluido de acuerdo con el libro Neumática Práctica (Nicolás, 2009); cuando se hace por medio de un fluido, la fuerza aplicada sobre el fluido confinado se transmite con igual intensidad en todas las direcciones; cuando es por medio de un sólido al aplicarle una fuerza, esta generará una fuerza resultante que seguirá la misma dirección que la aplicada originalmente. Se puede multiplicar la fuerza mecánica si la superficie donde se ejerce la presión es mayor que la parte móvil que produce la presión, esto provocará que la fuerza de salida sea mayor a la de la entrada.

### 1.2. VÁLVULAS NEUMÁTICAS.

Nicolás, A. (2009) menciona que las válvulas son dispositivos utilizados en la neumática con el fin de controlar el sentido, inicio, cantidad, dirección, y paro del flujo de aire en un circuito neumático. Las válvulas se pueden clasificar en: Válvulas de interceptación, válvulas de regulación y válvulas de distribución.

Las válvulas de interceptación permiten cambiar el sentido del aire o bloquearlo, según el caso que sea requerido.

Las válvulas de regulación permiten controlar el flujo de aire comprimido, variando en base a las necesidades requeridas ya sea el caudal o la presión.

Las válvulas de distribución se utilizan para controlar todo tipo de actuadores ya sean lineales o rotativos (cilindros o motores neumáticos) (p. 135).

### 1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS VÁLVULAS DISTRIBUIDORAS.

Las válvulas distribuidoras se pueden clasificar de acuerdo con su posición/número de vías, construcción interna y tipo de accionamiento.

#### *1.2.1.1 Posición/Número de vías.*

Cuando se hace referencia a la clasificación por número de vías, se quiere decir que las válvulas pueden ser de una, dos, tres o hasta más posiciones, mientras que el número de vías puede variar de dos a más vías.

Las posiciones se representan por cuadrados y siendo de uno solo, representando una posición, dos cuadrados dos posiciones y tres cuadrados tres posiciones como se puede observar en la figura 1.

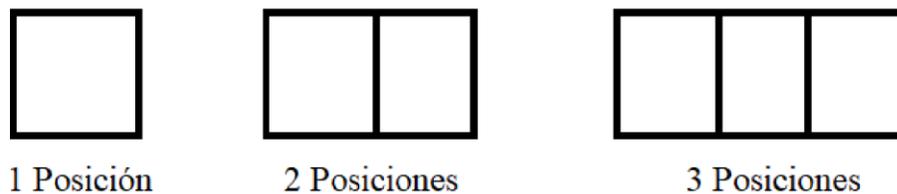


Figura 1. Simbología del número de posiciones en válvulas neumáticas (Hernández, J. 2022).

El número de vías puede variar dependiendo el uso que se quiera lograr, por ejemplo, se pueden encontrar válvulas de 3 vías 2 posiciones, lo que representan las vías son las entradas y salidas que posee cada bloque (cada posición), normalmente se usa el número 1 o la letra “P” para hacer referencia a la alimentación de presión, números pares como orificios de trabajo e impares como orificios de escape como se observa en la figura 2.

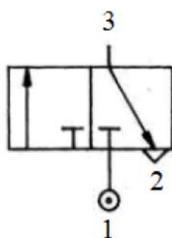


Figura 2. Válvula de 3/2. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 136). Madrid: Paraninfo (2009).

En la figura 3 podemos observar la simbología que se emplea y que es la siguiente: donde se ubica el número 1 representa una toma de presión, en el número 2 es una conexión general, en el número 3 es un escape directo a la atmósfera y en el 4 un escape conectado a tubo hacia la atmósfera.

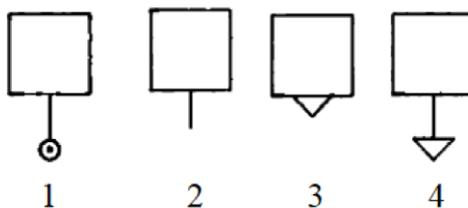


Figura 3. Representación simbólica de conexiones. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 136). Madrid: Paraninfo (2009).

Por esta razón lo que se observa en la figura 2 es una válvula de tres vías y dos posiciones, la cual es normalmente cerrada ya que en su primera posición se observa que la toma de presión tiene una línea transversal, la cual indica que no se permite el paso del aire, al

conmutar la válvula a su segunda posición es cuando se permitirá que el aire a presión alimente al actuador neumático, al lograr el paso del aire de 1 hasta 3.

#### ***1.2.1.2. Construcción interna. (Nicolás, 2009)***

Varios autores (Buenache, 2010; Nicolás, 2009) mencionan que cuando se habla de la construcción interna de las válvulas se pueden identificar entre válvulas de disco, de asiento y válvulas de corredera.

Las válvulas de discos son descritas por Buenache (2010) como “De accionamiento puramente manual, es un disco que se coloca manualmente sobre el (los) orificio(s) de paso del aire al accionar una palanca” (p. 45).

Por otra parte, las válvulas de asiento se caracterizan porque el obturador puede ser en forma de: (a) bolas, (b) planos o (c) conos, como se observa en la figura 4. Este tipo de válvulas los orificios se abren o cierran utilizando distintos tipos de asientos en el cual normalmente llevan incorporados muelles lo cuales servirán para posicionar el vástago, el cual requerirá una fuerza de accionamiento elevada para vencer la fuerza del muelle y la presión del aire.

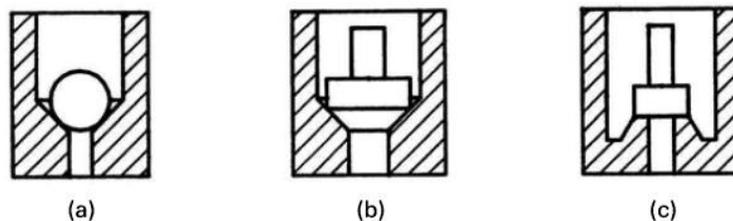


Figura 4. Válvulas de asiento: (a) bolas, (b) planos o (c) conos. Nicolás. N, Neumática práctica (p. 138). Madrid: Paraninfo (2009).

Las ventajas que presentan este tipo de mecanismos es que no tiene mucho desgaste lo que garantiza una gran duración y aunque se mencionó que se requiere gran fuerza para su accionamiento, resulta ser una ventaja cuando esta se encuentra cerrada debido a que la presión neumática ayuda a mantener con más fuerza de contacto aumentando así la estanqueidad.

Las válvulas de corredera basan su funcionamiento en émbolos cilíndricos los cuales poseen carretes, los carretes tienen secciones altas llamadas discos dispuestos consecutivamente como se observa en la figura 5, estos discos bloquean el aire al realizar movimientos axiales repartiendo así el aire neumático hacia las distintas conexiones por medio de las secciones inferiores de los carretes llamados surcos.

En la figura 5 se puede observar que cuando uno de los discos del carrete se encuentra obstruyendo el orificio de “P” (alimentación neumática) quedan comunicados el puerto “A” y “R” respectivamente sin que haya presión de trabajo debido al bloqueo en “P” lo que significa que el actuador comunicado a “A” no será capaz de realizar algún trabajo, mientras que cuando se conmuta el embolo a su otra posición queda ahora comunicado el puerto de alimentación neumática “P” con el actuador “A” lo que significa que se podrá realizar trabajo.

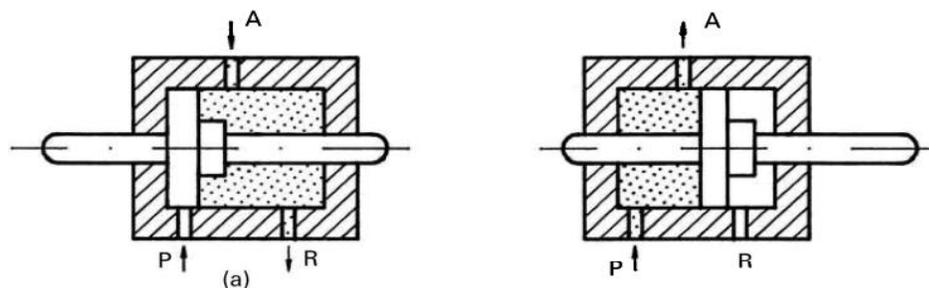


Figura 5. Válvulas de corredera. Nicolás. A, Neumática práctica (p. 138). Madrid: Paraninfo (2009).

Estos tipos de válvulas necesitan menor fuerza para conmutar las vías, sin embargo, presentan mayor desgaste debido a que el recorrido es más elevado y son más susceptibles a la suciedad.

### 1.2.1.3 Tipo de accionamiento. (Intor Manufacturing Solutions, 2013; Nicolás, 2009)

El tipo de accionamiento de las válvulas pueden ser manuales, mecánicos, neumáticos y electroneumáticos.

Las válvulas de accionamiento manuales son aquellas que necesitan de la intervención directa del operador y se encuentran constituidas por; (a) accionamiento general, (b) pulsador, (c) palanca con enclavamiento, y (d) pedal (Como se observa en la figura 6). Estas válvulas se sitúan normalmente en pupitres de mando y lugares donde pueden ser fácilmente manipuladas por el operador.

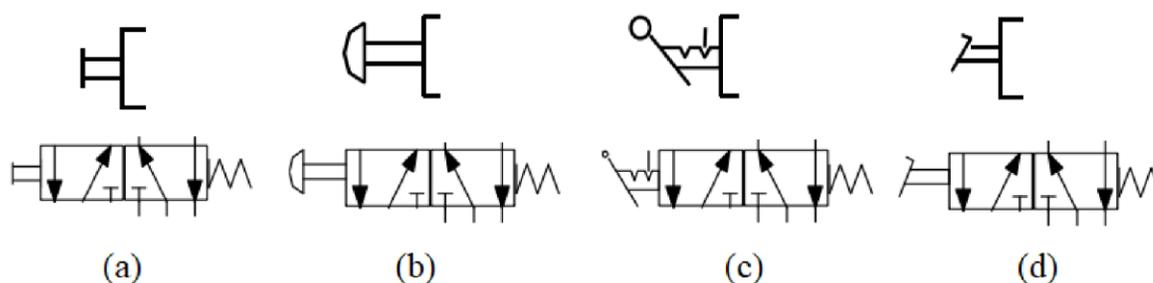


Figura 6. Tipos de accionamiento manual. (Hernández, J. 2022).

Las válvulas de accionamiento mecánico actúan directamente sobre el sistema interno de distribución de aire y son activadas por mecanismos externos o el vástago del propio cilindro como lo pueden ser: (a) por rodillo, (b) rodillo escamoteable, (c) con retorno por muelle o (d) centrado por muelle y suelen usarse como detectoras de posición (véase figura 7).

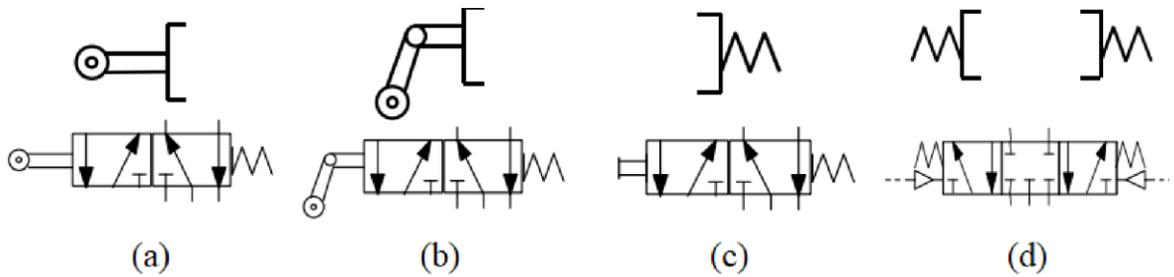


Figura 7. Tipos de accionamiento mecánico. (Hernández, J. 2022).

Las válvulas de accionamiento neumático son accionadas como su propio nombre lo indica, por medio de aire comprimido el cual puede ser aire almacenado en depósitos de almacenamiento, estas válvulas pueden ser de retorno por muelle o retorno neumático, lo que significa que en el primer caso al aplicar presión de aire para desplazar el núcleo de la válvula permitirá la alimentación hacia el actuador, y una vez se deje de aplicar dicha fuerza el muelle regresará la válvula a su posición original. En el caso de las válvulas con pilotaje en ambos lados se les conoce como biestables o con memoria, lo que quiere decir que al aplicar fuerza para desplazar el núcleo de la válvula se permitirá la conmutación para dirigir el aire hacia los actuadores y, aunque se deje de aplicar el accionamiento inicial permanecerá en esa posición hasta aplicar el pilotaje en otra posición.

Los accionamientos pueden ser: (a) neumático, (b) neumático - retorno al centro, (c) neumático en depresión, (d) diferencial, (e) diferencial alimentación externa, (f) diferencial sensible, como se muestra a continuación en la figura 8.

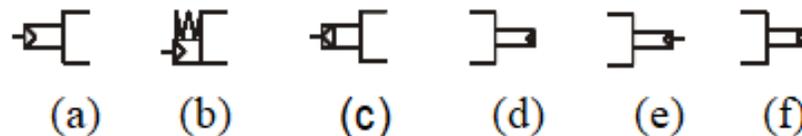


Figura 8. Accionamiento neumático. (Hernández, J. 2022).

Los accionamientos electroneumáticos son accionados cuando un dispositivo eléctrico recibe la orden y energiza el núcleo de la válvula conocido como solenoide la cual lo convierten en un accionamiento neumático, cuando se tienen válvulas de este tipo se les denomina electroválvulas, las cuales tienen accionamiento: (a) por bobina, (b) dos bobinas actuando opuestamente, y (c) control combinado de electroválvula y pilotaje, como se muestra en la figura 9.

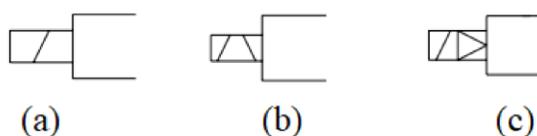


Figura 9. Accionamiento electroneumático. (Hernández, J. 2022).

### 1.3. ELECTROVÁLVULAS.

Las electroválvulas se definen de acuerdo con el fabricante Burkert Fluid Control System (2021) como “válvulas electromecánicas”, y son dispositivos diseñados para controlar el flujo a través de conductos como lo pueden ser tuberías, además (Sierra, L & García, I, 2015) mencionan que “Constan de un solenoide, el cual convierte energía eléctrica en energía mecánica, con el fin de hacer accionar la válvula haciendo que ésta se abra. Hay que tener en cuenta que en su estado de reposo la válvula siempre se encuentra normalmente cerrada, solamente cuando se excita el solenoide ésta cambia de estado. También existen otro tipo de electroválvulas que funcionan de forma contraria y se conocen como válvulas normalmente abiertas” (p.32).

Cuando se hace pasar corriente a través de un hilo conductor enrollado en un núcleo de hierro lo que se genera es un electroimán, en donde el núcleo se ve atraído por la bobina al ser conectada y desplazado por un resorte alojado en un extremo del núcleo de hierro, de esta forma es como se consigue accionar la electroválvula por medio de una bobina solenoide, dentro del cual se desliza el vástago de la válvula.

En general este tipo de válvulas pueden ser normalmente cerrada o normalmente abierta como se mencionó anteriormente; cuando se hace referencia a que es normalmente cerrada un muelle de retorno mantiene el émbolo presionado contra el orificio y esto impide el paso de caudal, cuando se energiza la bobina de solenoide, el campo magnético resultante hace elevarse el émbolo, permitiendo así el caudal. Cuando se hace referencia a que es normalmente abierta quiere decir que cuando no hay una señal eléctrica el paso del fluido no se verá interrumpido, si no hasta que ocurra lo contrario que al alimentar la bobina el émbolo selle el orificio y este a su vez el flujo.

### 1.3.1. TIPOS DE ELECTROVÁLVULAS (RODAVIGO, 2016).

Las electroválvulas se pueden clasificar en: mando directo o indirecto.

Las electroválvulas de mando directo se mantienen cerradas o abiertas hasta que se ejerce tensión sobre el solenoide ya que el flujo electromagnético ejerce fuerza sobre el muelle para abrirla o mantenerla cerrada.

Las electroválvulas asistidas son válvulas en que el solenoide no las controla directamente, sino que lo hace sobre una válvula piloto secundaria que produce energía y suministra la presión que necesita la válvula principal.

#### 1.4. CILINDRO NEUMÁTICO.

Los cilindros pueden ser componentes neumáticos, eléctricos e hidráulicos según la función para la que se vaya a destinar, por esta razón varios autores (Creus, 2007; Nicolás, 2009) señalan que los cilindros neumáticos son cilindros cerrados con un pistón en su interior y, mediante la acción del aire comprimido generan un movimiento lineal el cual será aprovechado por un vástago que se encargara de transmitir ese movimiento permitiendo el avance o el retroceso de un mecanismo. Este movimiento puede ser aprovechado para comandar la apertura o el cierre de una puerta, mover plataformas y en hidráulica se utilizan bastante para las prensas hidráulicas entre otras aplicaciones de mucha utilidad.

Los cilindros “generalmente se componen de la tapa trasera y delantera, de la camisa donde se mueve el pistón, el propio pistón, de las juntas estáticas y dinámicas del pistón y del anillo rascador que limpia el vástago de suciedad” (Creus, 2007, pág. 26) (Véase figura 10). Para conseguir la estanqueidad es preciso verificar que tanto el pistón como el vástago posean las correspondientes juntas de cierre.

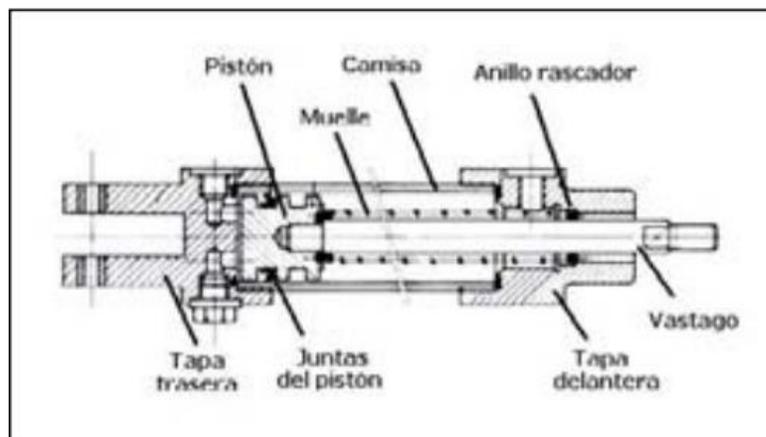


Figura 10. Cilindro neumático. Creus, S. Neumática e Hidráulica (p. 26). España: Marcombo, 2007.

#### 1.4.1. CILINDRO DE SIMPLE Y DOBLE EFECTO.

Existen diversos tipos de cilindros neumáticos, en este apartado se enfocará en los cilindros más comunes los cuales son: los cilindros de doble y simple efecto.

Este tipo de actuadores funcionan cuando el aire a presión entra en alguno de los orificios que posee, puede ser la cámara trasera o delantera según la función que se requiera y según se trate de un cilindro de simple o doble efecto, si el aire a presión es comunicado a la cámara trasera al llenarlo hará avanzar el vástago, que en la carrera provocará la compresión de la cámara delantera la cual expulsará el aire en su interior a través del orificio de salida; en la carrera inversa el vástago invierte su proceso, entrando el aire ahora por la cámara delantera y permitiendo la salida del aire en la cámara trasera de su respectivo orificio, y para el caso de cilindros de simple efecto un muelle o resorte provocara el retroceso. Este proceso de conmutación va controlado por una válvula de control asociada como lo pueden ser las electroválvulas

Conforme a (Creus, 2007; Universidad del País Vasco, 2013) en los cilindros de simple efecto, el émbolo recibe el aire a presión por un solo lado (orificio de entrada). Estos cilindros sólo pueden ejecutar el trabajo en un sentido (carrera de trabajo). La carrera de retorno del émbolo tiene lugar por medio de un muelle incorporado, o bien por fuerza externa (carrera en vacío). Una de las ventajas de este tipo de actuadores es que tienen un reducido consumo de aire y es ocupado como un elemento auxiliar como lo puede ser sujetar, expulsar, etc.

Por otra parte, los cilindros neumáticos de doble efecto al igual que los de simple efecto realizan su carrera de avance y retroceso debido a la acción del aire comprimido, pero a diferencia de estos últimos, el cilindro de doble efecto es capaz de utilizar ambas caras del

émbolo, lo que les permite realizar trabajo en ambos sentidos y siempre conservan aire en alguna de sus cámaras.

En conformidad con la Universidad del país vascos (Universidad del País Vasco, 2013) los actuadores de doble efecto dependiendo de la carga pueden ser cilindros amortiguados o sin amortiguación, y dentro de las ventajas que tiene su uso es que permiten un trabajo en ambos sentidos, toda la longitud del cilindro es una carrera útil y permite un retorno independiente de la carga.

#### 1.4.2. AMORTIGUAMIENTO DE LOS CILINDROS.

La amortiguación en los cilindros consiste en crear una cámara de aire al final del recorrido con la finalidad de que reduzca la velocidad el cilindro al final de su carrera, por este motivo es conveniente amortiguar los cilindros neumáticos porque al reducir la velocidad del pistón al llegar al final de su carrera se evita “el golpe del pistón contra el cilindro con la vibración resultante en la estructura y las tensiones mecánicas originadas. El ideal es que la velocidad del pistón al final de su carrera sea cero” (Creus, 2007, pág. 39). De igual manera al amortiguar se daría la oportunidad de obtener velocidades más elevadas de trabajo. La amortiguación se realiza sobre el mismo cilindro y básicamente consiste en crear un colchón de aire.

Nicolás, A. (2009) ha descrito el funcionamiento del amortiguador de cilindros como se muestra a continuación:

“En la figura 11, se presenta la parte delantera de un cilindro con amortiguación regulable. Se observa que al penetrar el pequeño pistón de frenado (3) en la cámara correspondiente, queda el aire retenido formando un cojín y es evacuado a la cámara

principal (1) que comunica con el aire exterior a través del conducto (5). El caudal de salida del aire de la cámara (4) es regulado a través del tornillo (2) como puede observarse” (P.93).

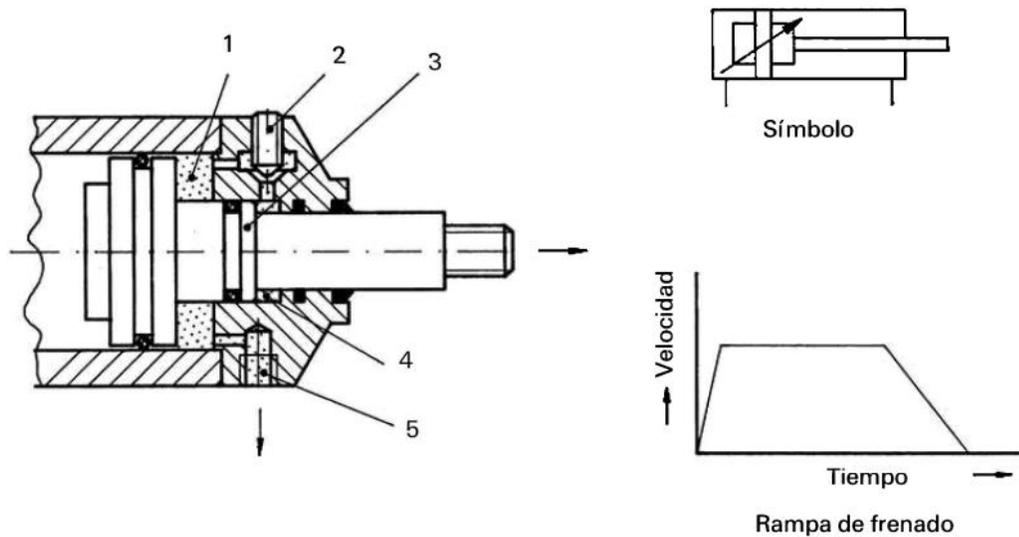


Figura 11. Cilindro con amortiguación delantera [Figura]. Nicolás, A. Neumática práctica (p. 93). Madrid: Paraninfo, 2009.

La cámara de amortiguamiento antes mencionada no solo se encuentra en la parte delantera del cilindro, también se encuentra en la parte trasera permitiendo amortiguar el retroceso del vástago hasta alcanzar su posición final. Contar con un amortiguamiento nos permite elevar la frecuencia de trabajo, debido a que nos permite obtener velocidades más rápidas y controlar el frenado, sin embargo, Clippard Instrument Laboratory (2016) señala que "Los cilindros amortiguados no están diseñados para desacelerar componentes de la máquina o tomar el lugar de los amortiguadores en aplicaciones con alta energía cinética" (p. 5).

### 1.4.3 SELECCIÓN DE UN CILINDRO NEUMÁTICO (MICRO, 2015).

Para hacer la selección del cilindro neumático se debe de tener en cuenta los siguientes parámetros como lo son: Fuerza teórica, presión de entrada y diámetro del émbolo y vástago.

Fuerza teórica ( $F_t$ ), la fuerza teórica es la suma de las fuerzas efectiva más el factor de seguridad, el factor de seguridad son porcentajes destinados a aumentar la fuerza eficaz a la hora de realizar el trabajo y garantizar una correcta ejecución de la tarea asignada, por otro lado, la fuerza eficaz es la fuerza que realmente necesita.

Algunos coeficientes de seguridad proporcionados por la empresa Micro (MiCRO, 2015), encargada de la fabricación de cilindros neumáticos son:

- Cilindro lento con carga al final de la carrera = 25%
- Cilindro lento con carga en toda la carrera = 35%
- Cilindro rápido con carga al final de la carrera = 35%
- Cilindro rápido con carga en toda la carrera = 50%

Presión de entrada, es la presión necesaria para realizar el trabajo que es requerido la cual se expresa en Pa (pascales) o psi (libras por pulgada cuadrada);

Por último, el diámetro del émbolo y el vástago, este último parámetro está relacionado a la geometría del cilindro y es importante tenerlo en cuenta ya que sobre el émbolo es donde se van a concentrar las presiones para realizar el trabajo.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados se puede determinar el diámetro del cilindro de acuerdo con la fórmula proporcionada en el manual de MiCRO representada en la fórmula 8.

$$D = \sqrt{\frac{\text{Fuerza teórica (N)}}{\text{Presión (Bar)} \times 0.0785}} \quad \dots (8)$$

Donde:

D = Diámetro del cilindro [mm].

Fuerza teórica = Fuerza efectiva + coeficiente de seguridad.

Factor de cálculo de área = 0.0785.

Si lo que se desea es conocer las áreas del cilindro, se debe tener en cuenta que los cilindros cuentan con tres áreas las cuales son: Área del pistón, área del vástago y el área anular. El área anular es la diferencia entre el área del pistón y el área del vástago como se puede ver a continuación en la figura 12.

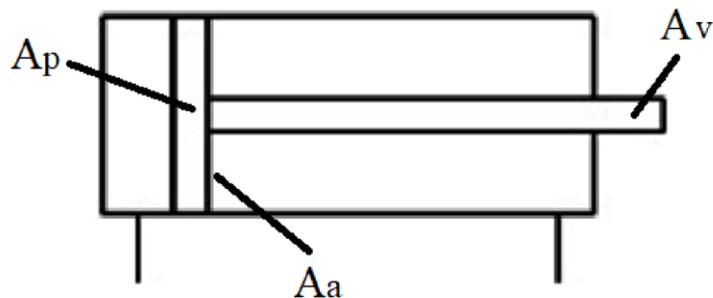


Figura 12. Áreas de cilindro neumático. (Hernández, J. 2022).

Por lo tanto, el área del pistón ( $A_p$ ) quedará definida como:

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad \dots (9)$$

El área del vástago ( $A_v$ ) quedará definido definida como

$$A_v = \frac{\pi D_v^2}{4} \quad \dots (10)$$

Obteniendo el área del pistón y el vástago se puede obtener el área anular ( $A_a$ ), siendo

$$A_a = A_p - A_v = \frac{\pi D_p^2}{4} - \frac{\pi D_v^2}{4} = \frac{\pi(D_p^2 - D_v^2)}{4} \quad \dots (11)$$

Donde:

$A_p$  = Área del pistón [ $mm^2$ ].

$A_v$  = Área del vástago [ $mm^2$ ].

$A_a$  = Área anular [ $mm^2$ ].

$D_p, D_v, D_a$  = Diámetro del pistón, vástago y anular [mm].

Otro parámetro importante es la relación de áreas denominado con la letra  $\beta$ , esta relación es el cociente entre el área del pistón sobre el área anular y se ve expresado en la ecuación 12, esta relación es importante ya que en algunos catálogos se proporciona este dato, y con él se puede conocer el área anular. Se debe tener en cuenta que la relación de áreas siempre debe de ser  $\beta > 1$ .

$$\beta = \frac{A_p}{A_a} = \frac{\frac{\pi D_p^2}{4}}{\frac{\pi(D_p^2 - D_v^2)}{4}} = \frac{D_p^2}{D_p^2 - D_v^2} \quad \dots (12)$$

Si se desea conocer la cantidad de fluido requerido en el actuador neumático se deben hacer los cálculos de volumen, para los cuales es necesario conocer que dentro del actuador se encontrarán dos volúmenes, uno donde se estará suministrando el aire y otro que se estará vaciando, además de tener en cuenta lo anterior es necesario conocer el diámetro, área y la carrera del vástago como se observa en la figura 13.

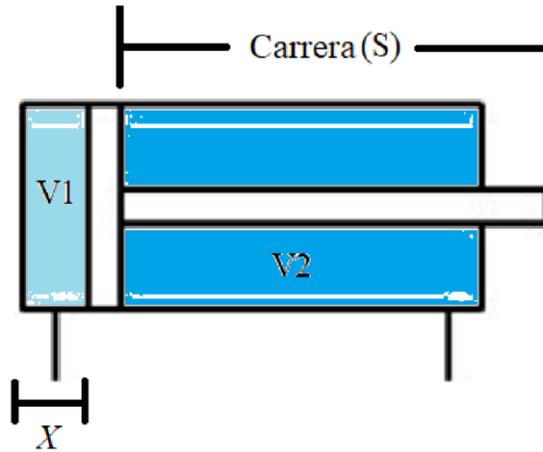


Figura 13. Volumen de cilindros. (Hernández, J. 2022).

Teniendo en cuenta estos parámetros se pueden conocer: el volumen uno ( $V_1$ ) y el volumen dos ( $V_2$ ), haciendo uso de las siguientes fórmulas, la carrera se considera en milímetros [mm].

$$V_1 = A_p \times Carrera (s) [mm^3] \quad \dots (13)$$

$$V_2 = A_a \times Carrera (s) [mm^3] \quad \dots (13)$$

Si lo que se desea conocer es el volumen en una posición específica, nótese que en la figura 13 se muestra una “x” que hace referencia a una distancia recorrida, entonces se deben emplear las siguientes fórmulas.

$$V_1 = A_p \times Distancia recorrida [mm^3] \quad \dots (13)$$

$$V_2 = A_a \times (Carrera (s) - Distancia recorrida) [mm^3] \quad \dots (13)$$

Otro dato importante es conocer las velocidades de avance y retroceso en un cilindro, para ello se debe tener en cuenta lo mostrado en la figura 14.

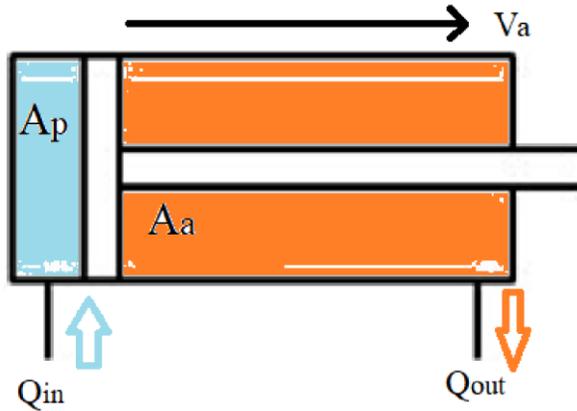


Figura 14. Velocidad de avance. (Hernández, J. 2022).

De la figura 14, se observa que sobre el área del pistón se estará ejerciendo presión por medio del caudal de entrada  $Q_{in}$  [l/min], y el área anular estará desalojando el aire en su interior durante su carrera, por lo que el otro extremo un caudal de salida  $Q_{out}$  [l/min]. Si se usa la ecuación (4) y se despeja la velocidad, se puede expresar de la siguiente manera la velocidad de avance.

$$\vec{V}_a = \frac{Q_{in}}{A_p} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \dots (14)$$

El caudal de salida estará definido por la siguiente expresión, en donde es preciso mencionar que se deben hacer las conversiones de unidades correspondientes ya que la velocidad de avance se encuentra en (m/s) y el área anular en ( $mm^2$ ).

$$Q_{out} = \vec{V}_a \times A_a \left[ \frac{l}{min} \right] \quad \dots (15)$$

Para conocer la velocidad de retroceso se debe hacer el mismo procedimiento, pero de manera inversa, es decir que ahora el caudal de salida será el de entrada y el de entrada será el de salida, como se muestra a continuación en la figura 15.

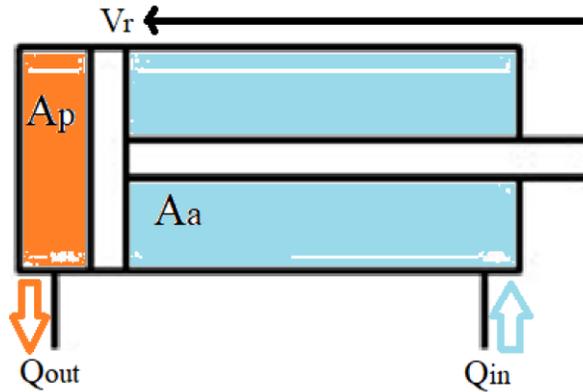


Figura 15. Velocidad de retroceso. (Hernández, J. 2022).

En esta ocasión se observa que el caudal de entrada ejerce presión sobre el área anular, mientras que el área del pistón desaloja el aire hacia la salida, por lo que la velocidad de retroceso está definida como.

$$\vec{V}_r = \frac{Q_{in}}{A_a} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \dots (16)$$

El caudal de salida estará definido por la siguiente expresión, en donde al igual que la ecuación (15) se deben hacer las conversiones de unidades correspondientes.

$$Q_{out} = \vec{V}_r \times A_p \left[ \frac{l}{min} \right] \quad \dots (17)$$

Si se utiliza la misma presión tanto para el avance como el retroceso se obtendrá una velocidad mayor en el retroceso, debido a que el área del pistón siempre será más grande que el área anular, por lo cual si se desea obtener las mismas velocidades tanto de avance y retroceso se deben igualar ambas velocidades como se muestra a continuación en la ecuación 18.

$$\vec{V}_a = \vec{V}_r$$

$$\frac{Q_{ina}}{A_p} = \frac{Q_{inr}}{A_a} \quad \dots (18)$$

Y despejando el caudal de entrada  $Q_{in}$ , y hace uso de la ecuación 12, queda la relación de áreas  $\beta$ , se obtiene la ecuación 19.

$$Q_{ina} = \frac{Q_{inr} \alpha A_p}{A_a}$$
$$Q_{ina} = Q_{inr} \alpha \beta \quad \dots (19)$$

De la ecuación 19, se puede inferir que, de la relación para igualar ambas velocidades, se determina que se necesita beta veces la relación de áreas en el retroceso para igualar la velocidad en la entrada.

Para conocer el caudal necesario para el actuador neumático se emplea la fórmula 20.

$$Q = \frac{\pi * D^2 * S * n * P_{abs} * N * 10^{-6}}{4} \quad \dots (20)$$

Donde:

$Q$  = Consumo de aire  $\left[ \frac{Nl}{min} \right]$ .

$D$  = Diámetro del cilindro  $[mm]$ .

$S$  = Carrera de cilindro  $[mm]$ .

$P_{abs}$  = Presión absoluta = Presión relativa de trabajo + 1 bar.

$N$  = Número de efectos del cilindro ( $N=1$  para cilindro de simple efecto;  $N=2$  para cilindro de doble efecto).

$n$  = Numero de ciclos completos por minuto.

Para conocer las fuerzas que actúan sobre los cilindros neumáticos se debe tener en cuenta que sobre ellos actúan dos fuerzas, una de avance y una de retroceso, las cuales serán diferentes al tener en cuenta que en el avance la presión será ejercida sobre el área del pistón como se muestra en la figura 16.

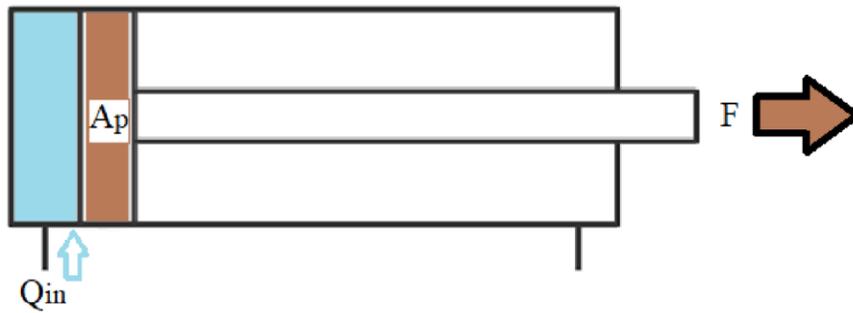


Figura 16. Actuación de la fuerza de avance. (Hernández, J. 2022).

Mientras que en el retroceso es distinta la fuerza ejercida, debido que la presión estará actuando sobre el área anular, como se observa en la figura 17.

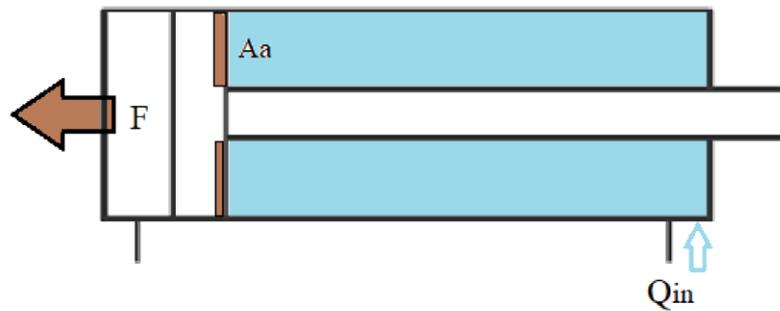


Figura 17. Fuerza de retroceso. (Hernández, J. 2022).

Para conocer el valor numérico de la fuerza requerida para realizar un trabajo o bien, la fuerza que será ejercida se puede obtener mediante la ecuación (1), la cual dice que la presión es igual a una fuerza ejercida sobre un área la cual está expresada en  $N/m^2$  que es equivalente a Pascales.

$$P = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} \quad \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

Ahora conociendo la ecuación de la presión, solo basta despejar la fuerza y poner las áreas en función de los diámetros de avance y retroceso del cilindro como se muestra a continuación.

La ecuación 21, se utiliza para encontrar la fuerza de avance ( $F_a$ ).

$$F_a = P * A_p \quad [N] \quad \dots (21)$$

Donde:

$F_a$  = Fuerza de avance  $[N]$ .

$P$  = Presión relativa de trabajo  $[Pa]$ .

$A_p$  = Área del pistón  $[m^2]$ .

La ecuación 22, se utiliza para encontrar la fuerza de retroceso ( $F_r$ ).

$$F_r = P * A_a \quad [N] \quad \dots (21)$$

Donde:

$F_a$  = Fuerza de avance  $[N]$ .

$P$  = Presión relativa de trabajo  $[Pa]$ .

$A_a$  = Área anular  $[m^2]$ .

La fuerza de avance y retroceso en cilindros de doble efecto, considerando su efectividad se hace con ayuda de las ecuaciones 22 y 23. Si no se cuenta con la información de

efectividad, de acuerdo con el autor A. Serrano (2009), menciona que, “si no se dispone de datos precisos, y a modo de orientación, basta considerar:

Para cilindros de hasta  $D = 40 \text{ mm}$   $R = 0.85$

Para cilindros superiores a  $D = 40 \text{ mm}$   $R = 0.95$ ” (P.94).

Entonces la fuerza efectiva de avance será:

$$F_a = P * A_p * R [N] \quad \dots (22)$$

La fuerza efectiva de retroceso será:

$$F_r = P * A_a * R [N] \quad \dots (23)$$

Para los cilindros de simple efecto con retorno por muelle, se debe considerar en la fuerza de avance la fuerza ejercida por el resorte, quedando de la siguiente manera [2]:

$$F_a = P * A_p * R - F_m [N] \quad \dots (22)$$

Donde:

$F_m =$  Fuerza del muelle  $[N]$ .

Tener en cuenta las variables y los parámetros que están involucrados en un cilindro neumático ayudará a hacer la correcta selección de este, y conocer los parámetros de operación permitirá la correcta selección del equipo del compresor, así como del tanque de almacenamiento para llevar a cabo las tareas asignadas de una forma satisfactoria.

## **1.5. COMPRESOR.**

“Los compresores son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión” (Fernández, s.f, pág. 1). La característica de aumentar la presión y aprovechar la misma para hacerlos fluir es lo que los distingue de sopladores y ventiladores los cuales igual manejan fluidos compresibles, pero no cambian sensiblemente la presión.

Este tipo de máquinas funcionan convirtiendo el trabajo generado por un motor en aire comprimido a alta presión. La presión generada se puede regular y ser adaptada según los requerimientos a los que vaya a ser sometido el compresor.

Las principales aplicaciones de este tipo de equipos son: en los sistemas de calefacción y refrigeración, generación de energía eléctrica, así como redes hidráulicas y eléctricas, donde la principal misión que deben de cumplir es alimentar la red de aire comprimido para los elementos, la recirculación del fluido a un proceso, alimentar un fluido a presión para mantener algún elemento requerido en circulación, producir las condiciones idóneas para la producción de reacciones químicas (Mavainsa, 2014; UNAM Facultad de Ingeniería, s.f).

Debido a la importancia que poseen estos equipos en la industria existe una gran variedad de gama en donde se pueden encontrar de acuerdo con el artículo de mundo compresores (CEJN The Quick Connect Solution Provider, s.f) compresores de desplazamiento positivo y compresores dinámicos. Dentro de los compresores de desplazamiento positivo se encuentran: los reciprocantes, de pistón, de tornillo, scroll y de paletas. Por otro lado, en los compresores dinámicos se encuentran los de tipo centrífugo y axial.

Para fines de este trabajo, se describirán los compresores de desplazamiento positivo, en específico los compresores de tipo tornillo debido a que es tipo de compresor que posee el tren ligero y, con la finalidad de conocerlo más a detalle.

#### 1.5.1. COMPRESOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO TORNILLO.

Dos investigaciones (Salazar, 2001; Mavainsa, 2014) mencionan que el principio de funcionamiento de los compresores de desplazamiento positivo se basa en la utilización de pistones o rotores para comprimir el gas el cual es absorbido en cantidades consecutivas dentro de espacios cerrados para reducir su volumen y con ello aumentar su presión hasta llegar a un valor previsto, momento en el cual el aire es liberado en el sistema.

Los *compresores de tornillos* constan de dos rotores helicoidales entrelazados contenidos en una carcasa de acuerdo con Hanlon (Hanlon, 2001), véase la figura 18.

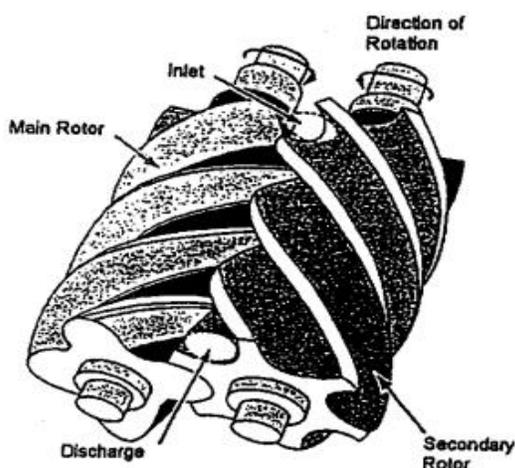


Figura 18. Tornillo rotatorio típico. Hanlon, P. Compressor Handbook (p. 401). New York: McGraw Hill, 2001.

Los compresores de tornillos de acuerdo con (Iván, 2008; Mavainsa, 2014) desplazan el aire mediante sus rotores por medio de las cámaras que se crean con el giro simultáneo y en sentido contrario de dos tornillos posicionados de forma paralela, denominados como macho y hembra, mientras los rotores giran se crea una cámara de compresión debido a que las ranuras están cerradas por las paredes de la carcasa lo que provoca que el aire vaya llenando el espacio disponible que hay entre los dos tornillos y por consiguiente que cada vez más se vaya comprimiendo el aire lo que desemboca en un aumento de presión.

El rotor principal el cual sería el rotor macho será accionado por un eje acoplado a un motor, por otro lado, el rotor hembra será accionado por el rotor principal al estar acoplados.

La capacidad y la descarga de presión determinarán la longitud y el diámetro de los rotores. Entre más largos sean los rotores, mayor será la presión y, de igual forma la capacidad de los rotores será definida por sus diámetros, así lo afirma Hanlon (Hanlon, 2001).

Las características que poseen este tipo de aparatos de acuerdo con (Iván, 2008) es, que son silenciosos, contienen un flujo continuo de aire, permiten obtener volúmenes y presiones controladas y que el flujo continuo de lubricante permite relaciones de compresión más altas en una etapa. Además, tienen la ventaja con respecto a los alternativos que son de tamaño menor para la misma potencia y permiten una mejor regulación para funcionamiento a cargas parciales pequeñas.

### 1.5.2 SELECCIÓN DE COMPRESOR.

Para hacer la selección de un compresor no se debe de hacer en función de los requerimientos mínimos, se debe de hacer de acuerdo en planeaciones futuras de expansión y considerando posibles fugas que, de acuerdo con el manual técnico de aire comprimido emitido por la Junta de Castilla y León, dicta que estas pérdidas se deben de encontrar por debajo del 10% (Junta de Castilla y León, 2012; Reynaga, 2021).

Entonces a la hora de seleccionar un compresor se deben consultar las especificaciones y fichas técnicas de toda herramienta neumática a utilizar, estas especificaciones siempre son dadas por los fabricantes y de ellas se puede obtener el consumo unitario que es indispensable para obtener el factor de utilización, aunque el factor de utilización resulta difícil de obtener en algunos casos, es recomendable basarse en el consumo medio en aplicaciones similares cuando no se disponga de este dato, teniendo en cuenta estos parámetros se puede obtener el consumo total para dimensionar el compresor que se requiere (Atlas Copco, 2014).

De acuerdo con (Reynaga, 2021) para la selección del compresor, primero se obtiene el coeficiente de utilización de cada herramienta el cual es el cociente del tiempo de trabajo de las herramientas sobre el tiempo en el que están en uso.

$$Co_u = \frac{\text{Tiempo de trabajo}}{\text{Tiempo en uso}} \quad \dots (22)$$

Obtenido el coeficiente de utilización se puede obtener el consumo útil de cada herramienta el cual se puede obtener de la ecuación 23.

$$\text{Con. Ut} = C_u * n * Co_u \quad \dots (23)$$

Donde:

Con. Ut = Consumo útil [*l/min*].

C<sub>u</sub> = Consumo unitario [*l/min*].

n = Número de herramientas.

Co<sub>u</sub> = coeficiente de utilización.

Ahora bien (Reynaga, 2021) menciona que, el consumo útil dicta la demanda de caudal requerido por cada equipo a utilizar, pero este valor no es el único a considerar para el dimensionamiento del compresor. Hay que recordar que para el dimensionamiento no se debe seleccionar en base a la demanda actual de consumo, sino pensando en expansiones futuras y pérdidas.

En el manual técnico de aire comprimido de la Junta de Castilla y León indican un procedimiento para la determinación de fugas. En su método describen que se debe poner el compresor en marcha cuando no hay demanda en el sistema, con ello se logra una serie de mediciones donde determinan el tiempo medio en que el compresor carga y descarga el sistema, y estas cargas y descargas intermitentes serán producto de las fugas (Junta de Castilla y León, 2012).

La fuga total (expresada en porcentaje) se puede calcular como sigue:

$$Fuga (\%) = \frac{T \times 100}{(T+t)} \quad \dots (24)$$

Donde:

t<sub>on</sub> = Tiempo en carga o en ON [*min*].

$t_{off}$  = Tiempo en descarga o en OFF [*min*].

Una vez teniendo los porcentajes en fuga y considerando un margen adecuado para futuras expansiones se puede obtener el consumo total útil (Reynaga, 2021).

$$C.T.U = Con.Ut * [Fuga (\%) + Expansión (\%)] \quad \dots (25)$$

Donde:

$$C.T.U = \text{Consumo total útil} \left[ \frac{m^3}{min} \right].$$

La presión estará determinada por el trabajo a realizar y es la cantidad de fuerza necesaria para realizar cierta cantidad de trabajo en cualquier punto en el tiempo. La presión de trabajo correcta no dependerá únicamente del compresor, sino también del diseño del sistema de aire comprimido y sus tuberías, válvulas, secadores, filtros, etc.

Otro factor para tener en cuenta es la eficiencia del compresor y, se sabe que es la relación del cociente del trabajo que idealmente se tiene sobre el trabajo que realmente se necesita para que opere el compresor y, teniendo en cuenta que no existen máquinas 100% eficientes, la eficiencia del compresor no deberá ser mayor a 1 ( $\eta > 1$ ) o al 100%.

Para conocer la eficiencia global de un compresor se puede calcular de la ecuación (26) donde  $\eta$  es la eficiencia global del compresor,  $w_{cs}$  es el trabajo que idealmente se tiene y  $w_{cr}$  el trabajo real que se necesita (Sánchez, 2020).

$$\eta = \frac{w_{cs}}{w_{cr}} \quad \dots (26)$$

Como “el trabajo del compresor es igual al cambio de entalpías, entonces ese cambio de entalpías se puede expresar como el producto de la capacidad calorífica a presión constante por la diferencia de temperaturas” (Sánchez, 2020).

$$w_c = C_p \times (T_2 - T_1) = \Delta h \quad \dots (27)$$

Donde:

$$W_c = \text{Trabajo del compresor} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$C_p = \text{Capacidad calorífica a presión constante} \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right].$$

$$T_1 = \text{Temperatura 1} [K].$$

$$T_2 = \text{Temperatura 2} [K].$$

$$\Delta h = \text{Diferencia de entalpías específicas} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

Por lo cual, la eficiencia global se puede expresar con la ecuación 26.

$$\eta = \frac{W_{cs}}{W_{cr}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad \dots (28)$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia global del compresor.

$$W_{cs} = \text{Trabajo ideal} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$W_{cr} = \text{Trabajo real} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$h_{2s} = \text{Entalpía 2 ideal} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$h_{2r} = \text{Entalpía 2 real} \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$h_1 = \text{Entalpía 1}.$$

De acuerdo con el Handbook de Paul C. Hanlon, para conocer la relación de caballos de fuerza (hp) de compresión se representa como:

$$Power\ input = \dot{m}_{gas} \times h_{gas} + \dot{m}_{coolant} \times h_{coolant} \quad \dots (29)$$

Donde:

$$\dot{m}_{gas} = \text{Flujo másico del gas} \left[ \frac{lbm}{sec} \right].$$

$$h_{gas} = \text{Aumento específico de la entalpía del gas} \left[ \frac{ft \cdot lbf}{lbm} \right].$$

$$\dot{m}_{coolant} = \text{Flujo másico del refrigerante} \left[ \frac{lbm}{sec} \right].$$

$$h_{coolant} = \text{Aumento específico de la entalpía del gas} \left[ \frac{ft \cdot lbf}{lbm} \right].$$

Una vez que se conocen las dimensiones y algunos parámetros de operación del compresor, hay un componente muy importante a tomar en cuenta a la hora de dimensionar el compresor, este componente es el depósito de aire. Por esta razón (Atlas Copco, 2014) menciona que “Cada instalación de compresores incluye uno o más depósitos de aire. Su tamaño esta en función de la capacidad del compresor, del sistema de regulación y del patrón de consumo de aire. El depósito almacena el aire comprimido, equilibra las pulsaciones del compresor, enfría el aire y recoge la condensación. Por tanto, el depósito de aire debe estar equipado con un dispositivo de drenaje del condesado”.

Para el dimensionamiento del depósito de compresores con regulación todo o nada y frecuencia variable se puede hacer como se muestra a continuación (Atlas Copco, 2014):

$$V = \frac{0.25 * q_c * P_1 * T_0}{f_{max} * (P_U - P_L) * T_1} \quad \dots (30)$$

Donde:

V = Volumen del depósito de aire [l].

$q_c$  = Capacidad del compresor  $\left[\frac{l}{s}\right]$ .

$P_1$  = Presión de entrada del compresor [bar].

$T_1$  = Temperatura máxima de entrada del compresor [K].

$T_0$  = Temperatura del aire comprimido en el compresor [K].

$(P_U - P_L)$  = Diferencia de presión ajustada entre carga y descarga [bar].

$f_{max}$  = Frecuencia máxima de carga  $\left[\frac{ciclos}{seg}\right]$ .

Por otro lado, para los compresores de frecuencia variable se emplea la siguiente fórmula

$$V = \frac{q * t}{P_1 - P_2} = \frac{L}{P_1 - P_2} \quad \dots (31)$$

Donde:

V = Volumen del depósito de aire [l].

q = Caudal de aire durante la fase de vaciado  $\left[\frac{l}{s}\right]$ .

t = Duración de la fase vaciado [s].

$P_1$  = Presión normal de trabajo en la red.

$P_2$  = Presión mínima para el punto de consumo [*bar*].

$L$  = Requisito de aire para la fase de llenado  $\left[ \frac{l}{\text{ciclo de trabajo}} \right]$ .

Con la obtención de estos parámetros se puede dimensionar un compresor junto con su tanque de almacenamiento de acuerdo con las necesidades y características de cada persona, basándose en catálogos de distribuidores de compresores para encontrar el equipo que mejor se adecue a las necesidades emergentes.

### **1.6 SECADOR DE AIRE.**

Los sistemas neumáticos requieren de aire comprimido libre de contaminación, para tener un excelente rendimiento debido a que el aire contaminado interfiere en la operación del sistema y sus componentes, entre más contaminado esté el aire menos confiabilidad se obtiene de un sistema neumático (Parker, 2019).

La importancia de tratar el aire comprimido radica en lo mencionado por (Creus, 2007), “el aire comprimido, por el hecho de comprimirse, comprime también todas las impurezas que contiene, tales como polvo, hollín, suciedad, hidrocarburos, gérmenes y vapor de agua. A estas impurezas se suman partículas que provienen del propio compresor, tales como polvo de abrasión por desgaste, aceites y aerosoles y los residuos y depósitos de la red de tuberías, tales como oxido, cascarilla, residuos de soldadura y las sustancias hermetizantes que puedan producirse durante el montaje de las tuberías y accesorios” (p.128).

Debido a los problemas que pueden surgir debido a malas condiciones en instalaciones neumáticas provocadas por humedad e impurezas es que se incorporan secadores de aire ya

que son equipos fundamentales debido a que pueden ayudar a controlar los niveles de vapor y humedad de agua en el aire comprimido. Los secadores de aire ayudan en el tratamiento del aire porque ayudan a que el aire sea más limpio y lo mantienen en condiciones óptimas para no generar corrosión y mal funcionamiento debido a la presencia de humedad y aceite en las instalaciones neumáticas (Ecuatoriana Industrial, 2022).

Existen una gran variedad de secadores de aire comprimido y entre los más comunes se encuentran los regenerativos, desecantes y secadores de membrana, pero la selección del equipo dependerá de los niveles de humedad y temperatura a los que se trabaja.

Los secadores de aire basan su principio de funcionamiento en que la habilidad del aire para retener líquidos se ve afectada al disminuir su temperatura, es por esto por lo que al utilizar un secador de aire se utiliza un sistema de refrigeración para bajar la temperatura del aire comprimido, esto provoca que el agua en forma de humedad se condense pasando de nuevo a su estado líquido, una vez condensado en el sistema este se remueve del sistema y así es como se reduce el contenido de humedad en el aire. Mientras el aire comprimido no se exponga a temperaturas de rocío por debajo de las que maneja no habrá más líquido condensado dentro del sistema (Como lo hago aprende fácil Mecánica Electricidad, 2021).

De acuerdo con (Kaeser, 2010) en su manual de técnica de aire comprimido dice lo siguiente:

“ Cuando el aire se enfría, como sucede después de la compresión, el vapor de agua se condensa. Esta es la razón por la cual un compresor con un caudal de  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  (ref. a  $+20$  °C de temperatura ambiente, un 70 % de humedad relativa y  $1 \text{ bar}_{abs}$ ) “Produce” en cada turno de ocho horas unos 30 litros de agua” (Pág. 9).

Con lo cual queda expuesta la necesidad de darle un tratamiento al aire para eliminar el condensado del sistema y de esta forma evitar daños y averías.

Algunos conceptos básicos dentro del proceso de secado de aire son la humedad relativa y el punto de rocío. En conformidad con Kaeser (2010) la humedad relativa ( $H_{rel}$ ) indica el grado de saturación del aire, que es la relación entre su contenido real de agua y el punto de saturación real y depende de la temperatura del sitio.

Por otra parte, el punto de rocío se clasifica en atmosférico y a presión. El punto de rocío a presión es la temperatura a la que el aire comprimido alcanza su punto de saturación (100%  $H_{rel}$ ) a su presión absoluta; El punto de rocío atmosférico es la temperatura a la cual el aire alcanza el grado de saturación del 100% ( $H_{rel}$ ) a presión atmosférica (p. 9).

#### 1.6.1 SECADOR DE AIRE REGENERATIVO.

Los sistemas de secado de aire desecantes tienen como función proporcionar aire limpio y seco. Este tipo de secadores purifican el aire comprimido al retirar la humedad y, están constituidos por un par de torres los cuales contienen algún tipo de desecante los cuales normalmente son carbón activado, silica gel y alúmina activada en el cual el vapor de agua se estará adhiriendo conforme el aire va pasando por las torres separando el aire de la humedad hasta alcanzar los parámetros deseados llamándose a esto proceso por adsorción (Atlas Copco, s.f; C & R Sistemas y Equipos, S. A. de C. V., 2017).

La adsorción de acuerdo con (Sainz, 2008) es un proceso termodinámico de separación de vapores contenidos en gases sin adicionar energía en forma de calor, y cuya separación de sustancias por adsorción se basa en el fenómeno de que los cuerpos sólidos porosos con gran

superficie tienen la facultad de retener partículas de gas sobre su superficie y, las sustancias pueden ser de nuevo desalojadas por otras como lo puede ser el mismo aire seco a contraflujo.

El desecante necesita regenerarse periódicamente para mantener su capacidad de secado, es por esto por lo que (Atlas Copco, s.f; NEUMATIC Compresores y Equipos Industriales, s.f) mencionan que, los secadores de aire regenerativos al estar constituidos de dos torres pueden lograr una regeneración constante, ya que mientras una torre seca el aire comprimido de entrada el otro se regenera y van alternando su funcionamiento conforme se van regenerando, consiguiendo prolongar la vida del desecante y permitiendo un funcionamiento continuo durante periodos prolongados.

La regeneración del desecante se puede hacer por varias formas, algunas de ellas pueden ser por purga, lo que significa que la regeneración se hace con aire comprimido generalmente a 7 bar de presión o, con aire caliente a 260°C hasta que el agua almacenada se haya evaporado, otra forma puede ser los regenerados en frío, los cuales utilizan una porción del aire comprimido para purgar la torre (C & R Sistemas y Equipos, S. A. de C. V., 2017; Mo's corner: mo explains, 2020).

#### 1.6.2 SELECCIÓN DE SECADOR DE AIRE.

Para la correcta selección del secador de aire se debe tener en cuenta de acuerdo con (Reynaga, 2021) el caudal de aire que suministra el compresor, la presión a la que se va a trabajar, el punto de rocío, temperatura de entrada del aire, temperatura ambiente del aire y el entorno de la instalación.

Teniendo esos datos, y haciendo uso de la ecuación (28) se puede dimensionar el tamaño adecuado del secador de acuerdo con los catálogos de los proveedores que más se adapte a

las necesidades específicas requeridas (Indutorres Tecnología Alternativa, 2022). Es importante mencionar que los factores de corrección son proporcionados por los fabricantes de los equipos y que la letra “N” en la siguiente expresión  $N * m^3/min$ . hace referencia a Normal Metro Cubico por Minuto, y por normal se entiende que son medidas normalizadas a temperatura ambiente de 273,15 K, presión atmosférica de 1 bar y humedad relativa del 0% (SERVIAIRE, 2019).

$$Q_s = \frac{Q_c}{C_t \times C_p} \quad \dots (32)$$

Donde:

$$Q_s = \text{Caudal del secador} \left[ \frac{N * m^3}{min} \right].$$

$$Q_c = \text{Caudal del compresor} \left[ \frac{N * m^3}{min} \right].$$

$C_t$  = Factor de corrección por temperatura.

$C_{pr}$  = Factor de corrección por presión.

Para conocer la humedad relativa ( $H_{rel}$ ) que es el grado de saturación del aire se puede hacer haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$H_{rel} = \frac{P_{resion\ real\ de\ vapor}}{P_{resion\ de\ vapor\ saturado}} \times 100 \text{ [%]} \quad \dots (33)$$

Donde:

$H_{rel}$  = Humedad relativa [%].

$P_w$  = Presión real de vapor [mmHg].

$P_s$  = Presión de vapor saturado [mmHg].

### 1.6.3 UNIDAD DE MANTENIMIENTO FRL.

La unidad de mantenimiento forma parte del tratamiento final del aire, la unidad de mantenimiento por sus siglas FRL hace referencia a: un Filtro de aire, un regulador de presión y un lubricador.

Es de suma importancia contar con la unidad de mantenimiento debido a que “el aire arrastra algunas impurezas de pequeño tamaño, que no han sido filtradas en el origen: partículas metálicas desprendidas al montar racores de unión y válvulas de paso, restos de oxidaciones interiores en tuberías y, también, restos de aceite de la lubricación que no han podido eliminarse del todo en el proceso de decantación junto al compresor. El agua a pesar de las decantaciones sucesivas sigue haciendo acto de presencia, aunque ya en reducidas proporciones” (Nicolás, 2009, pág. 86). Aparte Creus, A (2007) recomienda que “El conjunto no debe estar a más de 5 m. del dispositivo neumático de utilización para evitar la precipitación de las partículas de aceite en la tubería” (p. 141).

Debido a las pequeñas impurezas que permanecen en las instalaciones neumáticas es preciso someter al aire a un tratamiento final, la unidad de mantenimiento (Ver la figura 19) tiene el objetivo de garantizar la eficiencia y la durabilidad de las herramientas neumáticas.

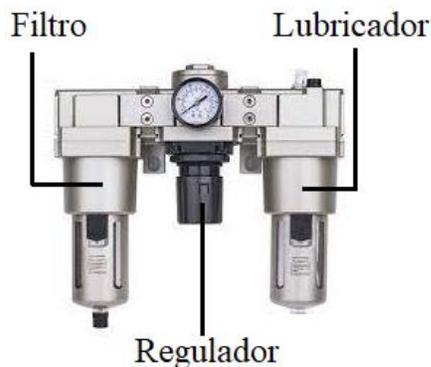


Figura 19. Unidad de mantenimiento (EVANS, 2017)

Varios autores (Nicolás, 2009; Creus, 2007) describen el funcionamiento de la unidad de mantenimiento como se muestra a continuación:

En primera instancia se encuentra el filtro, el cual tiene como objetivo eliminar partículas o impurezas no deseadas, así como del agua en suspensión, en el fondo del recipiente se almacenas las impurezas junto con el agua, esto se logra gracias a que la entrada de aire al filtro pasa por un deflector el cual hace que las partículas más pesadas que el aire (agua y aceite) choquen en las paredes del recipiente debido a fuerzas centrífugas haciéndolas caer al depósito que se encuentra al fondo y, antes de la salida del aire contienen un filtro poroso de 5 a 100 micras donde se quedan atrapadas las impurezas de mayor tamaño

Después se encuentra el regulador de presión cuya función es mantener una presión de trabajo adecuado para las herramientas, la cual es constante, y sobre este componente se instala un manómetro para conocer en todo momento el nivel de la presión regulada.

El último elemento es el lubricador el cual suministra aceite limpio al sistema el cual ayuda a reducir los desgastes en los actuadores y herramientas neumáticas al mínimo y proteger los aparatos contra la corrosión, y basa su funcionamiento en el efecto Venturi.

## **CAPÍTULO 2. MECANISMO DE PUERTAS.**

El presente capítulo tiene el objetivo servir como introducción al tren ligero de la CDMX, además de analizar el funcionamiento del mecanismo de puertas de servicio de pasajeros, con la finalidad de hacer una síntesis de las partes que lo conforman para comprender como se realiza el funcionamiento mecánico del sistema de puertas.

### **2.1 PUERTAS DE ACCESO A PASAJEROS.**

El tren ligero también conocido como material rodante actualmente está constituido por veinticuatro trenes de cuatro modelos diferentes, doce trenes TE-90, cuatro trenes TE-95, cuatro trenes TE-06 y cuatro trenes TE-12, el cual brinda un servicio a través de 16 estaciones y sus dos terminales en Taxqueña y Xochimilco desde 1986 con una longitud de operación de 13.04 km (Servicio de Transportes Electricos, 2023).

Los trenes que integran el Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México son trenes bidireccionales los cuales están conformados por dos carros-vagones (Ver los vagones en la figura 20) las cuales se encuentran unidas por medio de una articulación que permite al usuario moverse de un carro a otro, la articulación se encuentra dentro del pórtico central (Ver la figura 21) que sirve como conexión entre los dos carros los cuales son denominados como M1 (Motriz M1) y M2 (Motriz M2).



Figura 20. Un tren Ligero, compuesto de dos vagones. (Hernández, J. Fotografía tomada en el patio de pruebas del tren ligero, el día 25 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).



Figura 21. Pórtico de articulación. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Cada salón de pasajeros o vagón está provisto de 6 puertas de servicio (3 por cada lado) y en su totalidad está compuesta de 12 puertas de servicio por tren, las cuales se conforman por dos hojas del tipo deslizante interior.

El pórtico central contiene una sección llamada frente de articulación, ahí se encuentra un juego de electroválvulas (Figura 22) donde se necesitan de dos electroválvulas por cada 3 puertas laterales de un salón de pasajeros o vagón y, cada una tiene una función específica que se encarga de comandar ya sea la apertura o el cierre de las 3 puertas del costado correspondiente, y en total se forman 4 juegos para comandar todas las puertas de servicio del tren.



Figura 22. Electroválvulas de apertura y cierre de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Existen 2 electroválvulas adicionales (figura 23) que se encuentran independientes en los vagones con cabina ubicadas en la primera puerta de lado derecho de las puertas de servicio, las cuales cumplen con la función de dar ascenso o descenso al operador trabajando en conjunto con las electroválvulas que se encargan de las puertas de pasajeros.



Figura 23. Electroválvulas puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Como se podrá notar las electroválvulas cambian su modelo acorde en la posición en la cual se encuentran colocadas, pero su funcionamiento es exactamente la misma, las electroválvulas de la figura 22 son “*Serie K*” las cuales se distinguen por ser derechas o izquierdas y, las de la figura 23 son “*Directair 6*” que pueden ser ocupadas en posición derecha o izquierda y cuentan con un mando manual que corresponden a los trenes modelo TE-90 y TE-95, por otro lado, los trenes TE-06 y TE-12 cuentan con electroválvulas “*B6*” que al igual que las *Directair 6* no dependen de una posición en específico y cuentan con un mando manual, y se localizan tanto en el frente de articulación como en los vagones con cabina como se puede observar a continuación en la figura 24.



Figura 24. Electroválvulas B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

La puerta tiene un mando neumático y es accionada por un mecanismo provisto de un motor neumático (Figura 25. Motor neumático) el cual está instalado en un mecanismo que contiene un tornillo de paso contrario y el vástago del cilindro trasmite su energía cinética al tornillo y, al girar a través de unos elementos denominados seguidores de paso contrario desplaza ambas hojas de las puertas a la apertura y al cierre.



Figura 25. Cilindro neumático. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Este cilindro neumático es diferente en los modelos TE-90 y TE-95 a los instalados en los trenes modelo TE-06 y TE-12 como se puede ver en la figura 26, sin embargo, el funcionamiento es el mismo, la diferencia más notable es en su aspecto físico y que los cilindros de los trenes TE-90 y TE-95(2) deben ajustarse sus distancias respecto a los puntos de fijación de acuerdo a las medidas que posee el mecanismo de apertura y cierre de las puertas para su ensamble, mientras que los modelos para los TE-06 y TE-12(1) vienen hechos y calibrados a la medida para solo montarse y desmontarse en el mantenimiento.



Figura 26. Modelos de cilindros neumáticos. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 31 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

El mecanismo se fija sobre los costados de la caja del tren, y las hojas van unidas por la parte superior del mecanismo mediante unos soportes y un perfil especial en la hoja (figura 27). En la parte inferior del hueco de la puerta en la caja va montada una guía que encarrila las hojas en todo su recorrido como se muestra en la figura 28.



Figura 27. Mecanismo de puertas montado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).



Figura 28. Guía de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 1 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

El paso libre que permite este mecanismo es de  $1325 + 5$  mm de ancho y 1907 mm de altura como se muestra en la figura 29, donde el proceso de apertura y cierre de puertas es comandado por el Operador del Tren a través de unas botoneras tipo dominó desde la cabina que posea los mandos, ya sea M1 o M2 y pueden comandarse la apertura de puertas de cuatro formas: aisladas, ambas (las 12 puertas) o por costados (6 puertas de cada costado) por medio del conmutador de puertas (KP).



Figura 29. Puerta de pasajeros. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 1 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

### 2.1.1. CARACTERÍSTICAS Y OPERACIÓN DE PUERTAS.

El aire comprimido, la tensión eléctrica y la autorización desde la cabina es fundamental para el funcionamiento de apertura y cierre de las puertas del tren.

De la inspección de calidad de trenes en mantenimiento mayor (Ramírez, 2006) se obtuvieron los siguientes parámetros de operación del sistema de puertas mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de operación del sistema de puertas.

Parámetros de Operación	
Presión de aire	8 a 10 bar
<b>Tiempos (Tomando 7.5 bar como presión nominal)</b>	
Apertura tiempo total	2.5 a 3 segundos
Fase rápida de apertura y cierre	1.5 a 2 segundos
Fase amortiguada de apertura y cierre	1 segundo
Tiempo total de cierre	2.5 a 3.0 segundos
<b>Otros parámetros</b>	
Fuerza para abrir las puertas cuando el cilindro se encuentra presurizado por aire a 8 bar (116 psi)	93 kgf (205 lbf)
Voltaje nominal de operación de las electroválvulas	24 VCD
Rango de presión de trabajo del cilindro	6.8 a 10 bar (98.6 a 145 psi)

Este sistema consiste en un mecanismo del tipo deslizante neumático el cual está integrado por mecanismo de suspensión, electroválvulas, hojas de puertas y estanqueidad periférica.

La Unidad Programable de Servicios por sus siglas **UPS**, es la encargada de recibir la información proveniente del conmutador KP, y de los botones de cierre y apertura de puertas, estas señales, por medio de relevadores las convertirá en señales eléctricas para alimentar eléctricamente la bobina solenoide de las electroválvulas y, con ello dirigir el aire para la apertura o cierre de puertas para la salida o el acceso de pasajeros, mediante dos juegos de electroválvulas (un juego para cada lateral del vagón) formando en total cuatro juegos para ambos vagones y, un juego extra en cada extremo del vagón y adyacente al mecanismo de puertas derecho para comandar la puerta y cierre de puerta del operador.

El tiempo de apertura y cierre de las puertas es de 2.5 a 3 segundos, el cual consta de dos fases: la fase rápida se realiza en 1.5 a 2 segundos la cual acerca las hojas a 16 cm, y para la fase lenta se completa el cierre de las hojas en 1 segundo, la segunda fase (fase amortiguada)

se realiza de esa manera para evitar dañar a los usuarios ya que las puertas cierran con 93 *kgf*, así mismo evitar cierres bruscos que puedan dañar las puertas y deteriorar el mecanismo por cierres abruptos y choques, estas dos fases se logran gracias a un cilindro neumático de doble efecto y dos pasos.

Como se mencionó anteriormente para la puerta del operador existen dos electroválvulas independientes a las de puertas de pasajeros, y para ponerlas en función se hace mediante un selector ubicado en la cabina de conducción, al accionar el selector todas las puertas a excepción de la puerta del operador permanecerán cerradas con sostenimiento el cual evitará que se abran o cierren, el acceso a esta cabina es exclusivamente por la puerta derecha contigua a la cabina de conducción (Ver la figura 30).

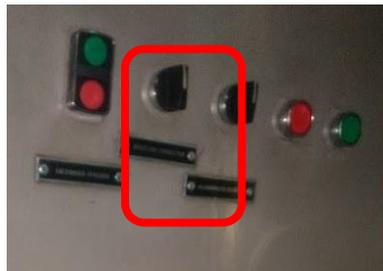


Figura 30. Selector puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 12 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

### 2.1.2 CONTROL DEL SISTEMA.

Anteriormente se mencionó que el control de las puertas será comunicado por la Unidad Programable de Servicios, por medio de un conmutador “KP” que se encuentra localizado en el pupitre de conducción. Con el conmutador “KP” se determina la apertura en sentido izquierdo o derecho y también permite la apertura y cierre de ambas puertas o una posición neutral para aislarlas. Cuando se tengan en servicio ya sean las puertas derechas o izquierdas,

el costado opuesto a las puertas en servicio permanecerán cerradas por sostenimiento neumático mediante la alimentación de electroválvulas de cierre.

El conductor puede comandar con el botón de “anuncio de salida” y una señal audible a los pasajeros para indicarles que las puertas serán cerradas, esta señal permanece presente hasta que el operador presione el botón de cerrar puertas o este sea cancelado mediante el botón de apertura o anulación.

Con el botón de cierre ubicado en el pupitre de la cabina de conducción se comanda el cierre de puertas el cual será necesario mantener presionado hasta que todas las puertas se cierren por completo y se active en forma automática el mantenimiento de cierre. El mantenimiento de cierre es señalado en el pupitre con una lámpara preparada para tal fin, y al mismo tiempo se genera una señal audible a través del timbre monogolpe.

Se podrá ver interrumpido el cierre de las puertas si el botón se suelta antes de que las puertas estén cerradas, y durante la interrupción del cierre no se abrirán las puertas en forma automática ni se reactivará el anuncio de salida, pero se podrá reanudar nuevamente al presionar de nuevo el botón de cierre y el proceso continuará. El conductor podrá abrir las puertas presionando el botón de preparación de apertura, con lo que se cancelará el proceso de cierre.

El cierre de puertas estará condicionado a que transcurra un mínimo de 3 segundos después de iniciado el anuncio de salida.

Para preparar la apertura de las puertas el conductor deberá comandarla a una velocidad igual o menor a 6 *km/h* para que pueda ser efectiva.

Para poder hacer la preparación de apertura se necesita que la velocidad sea menor a 2 *km/h*. Al igual que el mantenimiento de cierre la preparación de apertura se señala en el pupitre con una lámpara preparada para tal fin.

Una vez que la apertura está preparada y, cuando la velocidad del tren sea menor a 2 *km/h*, las puertas estarán listas para abrir a menos que se presione el botón de anulación de apertura, lo cual provocará que la preparación de apertura sea cancelada y se mantendrán las puertas cerradas. Para llevar a cabo la operación de preparación de apertura, anulación de apertura y anuncio de cierre solo basta presionar y soltar los botones para que su función sea completada.

La presión de aire de apertura se mantendrá y cambiará una vez que se le dé la señal de cierre a la UPS, esto se hará hasta que el mando de cierre sea realizado por el conductor y, en el exterior de cada sección M1 o M2, por cada lado, habrá una indicación luminosa de que alguna puerta está abierta esta señal tiene como nombre "Cartero doble" como se puede ver en la figura 31.



Figura 31. Cartero. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 14 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

## 2.2 PARTES QUE CONFORMAN EL MECANISMO DE PUERTAS.

Conocer las partes que integran el mecanismo y su funcionamiento individual es fundamental para entender el funcionamiento en conjunto del mecanismo, es por esto por lo que se describirá el funcionamiento del mecanismo de suspensión, la descripción del movimiento del mecanismo y componentes del mecanismo de puertas.

### 2.2.1 MECANISMO DE SUSPENSIÓN.

El sistema de suspensión, apertura y cierre de puertas ha sido diseñado para trabajar con la mayor eficiencia y con el menor mantenimiento posible, este sistema cubre los modelos N-301038 y N-301039 derecho e izquierdo respectivamente, los cuales pertenecen a las puertas que permiten el acceso de los usuarios y los cuales son activados neumáticamente como se muestra a continuación en el banco de pruebas de la figura 32.



Figura 32. Mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Este mecanismo sujeta un par de hojas (puertas) como se observa en el banco de pruebas de la figura 33, las cuales recorren una trayectoria en dirección contraria, para dar paso al cierre hacen una trayectoria hacia el centro y hacia los extremos para abrir, como se mencionó anteriormente en los trenes hay 3 puertas por lado del vagón, para manipular estas puertas este mecanismo al accionarse neumáticamente lleva el control en el cierre, apertura o sostenimiento de estas.



Figura 33. Banco de pruebas de mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

#### **2.2.1.1. Mecanismo N-301038.**

Para saber la posición del mecanismo de puertas se debe observar desde adentro del vagón y en la dirección donde se ubican las cabinas, que pueden ser M1 o M2, y al hacerlo desde M1 indica que se trata de un mecanismo derecho. Este mecanismo está fijo por medio de dos placas a la estructura del vagón sujeto por ambos extremos y al centro de una corredera de bolas.

Al ser derecho el mecanismo y al presurizarse la parte inferior del cilindro neumático por su posición hace que su vástago salga hacia la derecha, transmitiendo este movimiento a una corredera grande por medio de una abrazadera del actuador. Por consiguiente, la fuerza ejercida por el vástago será mayor en la puerta de lado derecho que en la de lado izquierdo.

Como consecuencia de abrir las puertas la corredera grande que posee el mecanismo ocupará más espacio, por lo que se debe considerar respetar un espacio libre hacia la derecha para no afectar su operación con algún objeto que pueda obstruir el libre movimiento de la trayectoria del mecanismo.

El seguidor de tornillo de paso contrario en la traslación horizontal hacia la derecha produce un movimiento rotatorio del tornillo de paso contrario, el cual provoca el movimiento del seguidor de paso contrario izquierdo gracias a que está unido rígidamente a la corredera chica por medio de una abrazadera, y a que el movimiento generado por el seguidor derecho provoca un giro inverso el cual desplaza al seguidor izquierdo de forma horizontal, produciendo de esta forma la apertura simultánea de ambas puertas.

El soporte del cilindro neumático está colocado sobre una corredera grande que se encuentra ubicada de lado derecho, y una leva que actúa al micro switch está colocada del lado izquierdo sobre una corredera más corta.

Colocado del lado izquierdo justo atrás del cilindro se encuentra el soporte del micro switch que detecta el cierre de las puertas, es importante identificar que el micro switch está diseñado para mandar señal girando su operador en sentido contra horario.

#### ***2.2.1.2. Mecanismo N-301039.***

Orientando la vista desde dentro del vagón y suponiendo esta vez estar en M2 se hace notar que se trata del mecanismo izquierdo. Este mecanismo por medio de dos placas está fijo a la estructura del vagón sujeto por ambos extremos y al centro de una corredera de bolas.

Al ser izquierdo el mecanismo y al presurizarse la parte anterior del cilindro neumático por su posición hace que su vástago salga hacia la izquierda, transmitiendo este movimiento a una corredera grande por medio de una abrazadera del actuador. Por consiguiente, la fuerza ejercida por el vástago será mayor en la puerta de lado izquierdo que en la de lado derecho.

Como consecuencia de abrir las puertas la corredera grande que posee el mecanismo ocupará más espacio, por lo que debe considerar respetar un espacio libre hacia la izquierda

para no afectar su operación con algún objeto que pueda obstruir el libre movimiento de la trayectoria del mecanismo.

El seguidor de tornillo de paso contrario en la traslación horizontal hacia la izquierda produce un movimiento rotatorio del tornillo de paso contrario, el cual provoca el movimiento del seguidor de paso contrario derecho gracias a que está unido rígidamente a la corredera chica por medio de una abrazadera, y a que el movimiento generado por el seguidor derecho provoca un giro inverso el cual desplaza al seguidor izquierdo de forma horizontal, produciendo de esta forma la apertura simultánea de ambas puertas.

El soporte del cilindro neumático está colocado sobre la corredera grande que se encuentra ubicada de lado izquierdo, y una leva que actúa al micro switch está colocada del lado derecho sobre una corredera más corta.

Colocado del lado derecho justo atrás del cilindro se encuentra el soporte del microswitch que detecta el cierre de las puertas, es importante identificar que el micro switch está programado para mandar señal girando su operador en sentido horario.

#### ***2.2.1.3. Diferencias entre los mecanismos de puertas.***

Los mecanismos N-301039 y N-301038 son similares, lo que hace que se diferencie uno con el otro es su orientación, por lo que tenemos que el mecanismo N-301039 es izquierdo, mientras que el N-301038 es derecho lo que significa que el lugar donde se apoya el cilindro neumático cambia, así también como lo son el movimiento de la leva, y el microswitch que detecta el cierre de puertas. Al tener estas variaciones en su configuración se permite colocar los mecanismos en diferentes partes del vagón de pasajeros, por lo cual es importante identificarlos y reconocerlos para poder hacer una intervención adecuada, en resumen, los

mecanismos son iguales, pero simétricamente opuestos, los que los define como derechos e izquierdos.

Entonces tenemos que las diferencias que existen entre los mecanismos N-301039 y N-301038 son:

- La posición del cilindro neumático.
- La posición y dirección de movimiento de la leva.
- Se intercambian las correderas (Hay corredera larga donde actúa el cilindro; y una corta).
- La posición y orientación del microswitch que detecta el cierre de puertas.

### 2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DEL MECANISMO.

La función del mecanismo neumático es transformar la energía potencial almacenada en un tanque de aire presurizado, en energía mecánica, de tal forma que se efectúen movimientos de apertura y cierre. Esta energía transmitida debe estar en todo momento dirigida y bajo completo control, de lo contrario no podrá convertirse en trabajo útil o la maquinaria u operadores pueden llegar a sufrir algún daño.

Para lograr lo anterior el compresor se encarga de llenar un depósito principal de 250 l, el cual será distribuido por la tubería de equilibrio, es importante mencionar que este aire proveniente del tanque de almacenamiento previamente pasó por un filtro de aceite, filtro de aire y un secador de aire, ya que el aire neumático debe ser un aire limpio y libre de humedad, el aire neumático por medio de unas electroválvulas es distribuido a los cilindros cumpliendo así la alimentación de los actuadores y por consiguiente la transformación de la energía potencial almacenada en energía para abrir o cerrar las puertas.

Cuando se desenergiza las electroválvulas de cierre y se energizan la de apertura, simultáneamente se da lugar a la apertura de las puertas, siendo lo mismo, pero en sentido inverso al cierre de las puertas. En ambos casos el movimiento se realiza en dos fases, una rápida al principio y una lenta al final para evitar un cambio brusco en la inercia del mecanismo y evitar algún daño físico a los pasajeros o trabajadores del servicio.

El tiempo total de apertura es de 2.5 a 3 segundos y la fase amortiguada en el cilindro se efectúa en los últimos 8 centímetros de su carrera. Durante el cierre la fase rápida se realiza en 1.5 a 2 segundos y la amortiguada en 1 segundo, realizándose en los últimos 8 centímetros de la carrera del cilindro (16 centímetros de separación de puertas) en un total de 2.5 a 3.0 segundos.

### 2.2.3 COMPONENTES DEL MECANISMO DE PUERTAS.

Identificar y conocer los componentes que integran al mecanismo de apertura y cierre de puertas es fundamental, debido a que permite obtener una visión clara de la importancia de cada uno de ellos en conjunto, y con ello conocer cómo se involucran dichos componentes para realizar el trabajo requerido, al mismo tiempo que ayuda a la comprensión general al servir como enlace para conectar los conceptos previamente vistos del funcionamiento de puertas.

Los componentes involucrados en el funcionamiento del mecanismo de puertas son: Tornillo de paso contrario, perno prisionero, seguidor de tornillo de paso contrario, excéntrica, sensor de posición y cilindro neumático, los cuales serán explicados a través de los siguientes apartados.

### ***2.2.3.1. Tornillo de paso contrario.***

El tornillo de paso contrario consiste en un eje roscado en casi toda su longitud con excepción de la parte central, este tornillo tiene la función de dar la conjugación de las puertas.

El tornillo es una barra de acero plata maquinado con un doble paso de 80 *mm* con rosca de doble entrada, una rosca derecha y otra rosca izquierda hasta la mitad del tornillo como se muestra en la figura 34. Sobre el tornillo se desplazan dos seguidores de paso contrario los cuales arrastran unas correderas por medio de las abrazaderas del seguidor (Figura 35), sobre las mismas correderas llevan sujetas por medio de unas “T” las hojas (puertas) lo que provoca la apertura o cierre debido a los desplazamientos



Figura 34. Tornillo de paso contrario. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de abril de 2022, Huipulco CDMX).



Figura 35. Horquillas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Para la regulación del tornillo de paso contrario, el cual debe ser de 0.4 a 6 mm de juego longitudinal entre el mismo y los porta tornillos de paso contrario, se regula por medio de los prisioneros de ajuste y las contratueras que se encuentran en los extremos de este. Esta regulación es necesaria para evitar que fuerzas de compresión permanentes sobre las flechas se transmitan, así como lo pueden ser igual fuerzas excesivas de fricción.

Este juego debe ser verificado una vez que el mecanismo y las puertas han sido instaladas.

### **2.2.3.2. Perno prisionero.**

El perno prisionero (figura 36) se encuentra ubicado sobre la parte lateral de la corredera de bolas sujeto con tornillos Allen, cuando el mecanismo es activado genera esfuerzos axiales debido a esto es necesario un componente que pueda disipar esa energía y actuar como amortiguador de tal forma que no solo sea un soporte rígido de lo contrario se seguirán creando esfuerzos los cuales pueden provocar algún daño en el mecanismo.



Figura 36. Perno prisionero. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

El perno tiene una ranura por la cual lleva un balín mismo que deberá estar lubricado, por la misma ranura ubicada en las partes laterales donde se posiciona el balín se inserta un eje del tornillo de paso contrario el cual debe llevar un ajuste de 4 mm de tolerancia de juego axial el cual fungirá como un amortiguamiento para que el tornillo sin fin no esté muy rígido.

### ***2.2.3.3. Seguidor de tornillo de paso contrario.***

Los seguidores de paso contrario hacen la función de una tuerca, por consiguiente, transmite su movimiento al tornillo de paso contrario cuando el seguidor se desplaza longitudinalmente, estos seguidores tienen una forma cilíndrica y en el centro por la parte externa cuentan con dos cavidades para ser sujetados por unas horquillas (figura 35) como se observa en la figura 37.



Figura 37. Seguidores de tornillo de paso contrario. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Estos seguidores se encuentran ubicados cada uno sobre la parte derecha e izquierda del tornillo de paso contrario, como se observó en la figura 34, orientados respecto al sentido de rosca el cual puede ser izquierdo o derecho y logra su desplazamiento debido a que en su interior existen dos ranuras con un paso igual al del tornillo.

Los seguidores transmiten su movimiento longitudinal, pero en direcciones opuestas al girar el tornillo de paso contrario, la transmisión del movimiento longitudinal se logra debido a que el tornillo de paso contrario cuando el seguidor que está sujeto a él lo obliga a girar debido al accionamiento del cilindro neumático, transmite el movimiento giratorio en un movimiento longitudinal hacia el seguidor opuesto.

Los seguidores poseen de 36 a 38 balines de acero y se encuentran circulando dentro de la cavidad entre el tornillo y el seguidor del tornillo, los balines van avanzando de forma cíclica durante el movimiento del mecanismo y, en caso de necesitar reducir el juego del mecanismo se pueden agregar hasta un máximo de 40 balines.

Los seguidores cuentan con una placa que sirven como guía y reten como se muestra en la figura 38 para que los balines se mantengan en su posición, entonces cuando el seguidor se encuentra desplazándose a lo largo del tornillo, los balines se encuentran realizando un movimiento de avance continuo, lo cual significa que pueden regresar a su posición inicial dependiendo del desplazamiento realizado.



Figura 38. Guía y reten de balines. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

#### ***2.2.3.4. Excéntrica.***

La excéntrica está formada por dos cuerpos cilíndricos pero desfasados de su centro el cual está sostenido por medio de dos cojinetes por su parte externa, como se muestra en la figura 39. Al estar sostenido por la parte externa está sujetando la parte cilíndrica que se encuentra desfasada del centro de giro lo que provoca que al cambiar su posición como resultado se verá reflejado un cambio de altura.



Figura 39. Excéntrica. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

En el mecanismo de puertas cuenta con cuatro excéntricas las cuales están posicionadas sobre las placas de corredera, dos para cada hoja de puerta, y a su vez las placas de correderas están fijadas a las correderas, una chica y una grande las cuales van posicionadas sobre una caja de bolas por las cuales por medio de balines le permite realizar su desplazamiento horizontal, estas excéntricas llevan consigo una “T” la cual sirve como soporte para sostener las puertas como se observa en la figura 40.

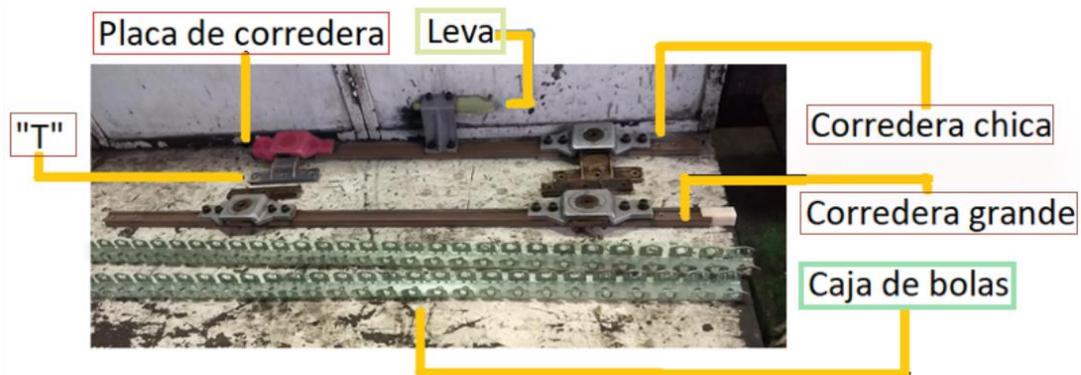


Figura 40. Partes del mecanismo de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Como se explicó la función principal de los excéntricos es dar altura a las puertas mediante las T, esto se hace con ayuda de una llave dentada especial la cual la hace girar hacia la derecha o hacia la izquierda, según el movimiento que sea requerido y un máximo de 2 mm, es necesario revisar que esta operación se haga de forma correcta, de lo contrario se verá el desajuste en las puertas debido a que presentan un desnivel a la hora de cerrar las puertas, este desajuste no permitirá cerrar de forma paralela las puertas y deja una abertura diagonal

entre cada puerta, ya sea en su parte inferior o superior, en la figura 41 se observa de lado izquierdo una puerta con un ajuste correcto y de lado derecho como se observaría si no se ajusta de forma correcta.



Figura 41. Regulación de excéntricas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

#### ***2.2.3.5. Sensor de posición.***

En el conjunto del mecanismo se encuentra instalado un detector de posición (BKP) el cual dispone de dos contactos normalmente abiertos (NA) y dos contactos normalmente cerrados (NC), y su función es dar la señalización de puerta cerrada.

Una leva mediante movimientos mecánicos provocados por la acción de un cilindro neumático es la encargada de transmitir el movimiento de la puerta al sensor ubicado sobre el bastidor del vagón, como se muestra en la figura 42.



Figura 42. Detector de posición. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

La leva se encuentra ubicada sobre la corredera chica del mecanismo mediante un soporte, cuando el cilindro neumático es accionado, mueve la corredera grande debido a la sujeción mediante una abrazadera, de igual forma sobre la misma corredera se encuentra la horquilla que sujeta el seguidor de tornillo de paso contrario y, la fuerza de traslación emitida por el cilindro hacia los seguidores de paso contrario, se transmiten a ambos lados del tornillo mediante la transformación de traslación en forma de rotación, lo que provoca que al abrir la puerta la leva deje de ejercer fuerza sobre el detector y deje de pulsarlo como se muestra en la figura 43, emitiendo una señal en la cabina de que alguna o varias puertas se encuentran abiertas.

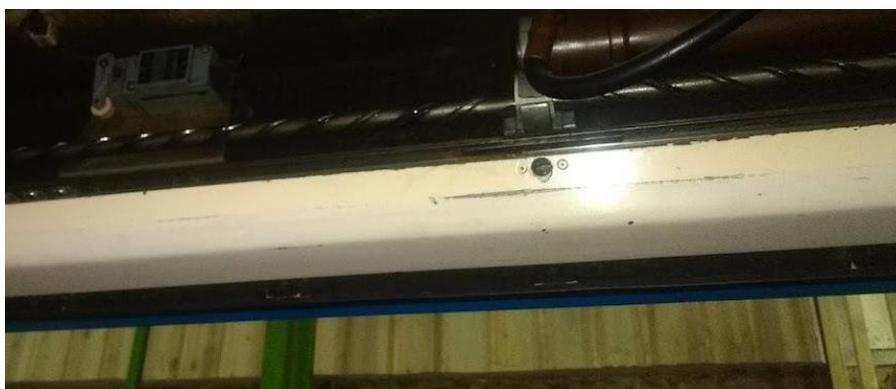


Figura 43. Detector de puerta abierta. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

#### ***2.2.3.6. Cilindro neumático.***

El cilindro neumático es diferente y varía entre los modelos TE-90, TE-95 y TE-06, TE-12 como se observó en la figura 26, este cilindro se encuentra situado sobre la corredera grande fijado por la abrazadera montaje del cilindro y la abrazadera del actuador.

En cada vagón hay 6 puertas, 3 izquierdas y 3 derechas y el cilindro neumático es el mismo para todos los mecanismos de puertas. El cilindro es alimentado por aire neumático (aire a presión), el cual proviene del motor compresor que tiene un rango de trabajo de 8 a 10 bar y

se encarga de alimentar la tubería de equilibrio, una vez que pasa por los componentes que filtran, limpian y quitan la humedad del aire, pasa por un regulador de presión calibrado a 6 bar.

El aire no pasa directo a los cilindros neumáticos, para que este aire sea comunicado debe pasar primero por las electroválvulas de tres vías y dos posiciones normalmente cerradas, que son operadas por un solenoide y retorno por resorte, como se mencionó con anterioridad, es necesario el uso de dos para comandar ya sea la apertura o el cierre de las puertas. Entre los modelos de trenes TE-90, TE-95(2) y TE-06, TE-12(1) las electroválvulas son de diferente modelo incluyendo las que comanda la puerta del operador (3) como se muestra en la figura 44, sin embargo, su funcionamiento es el mismo.

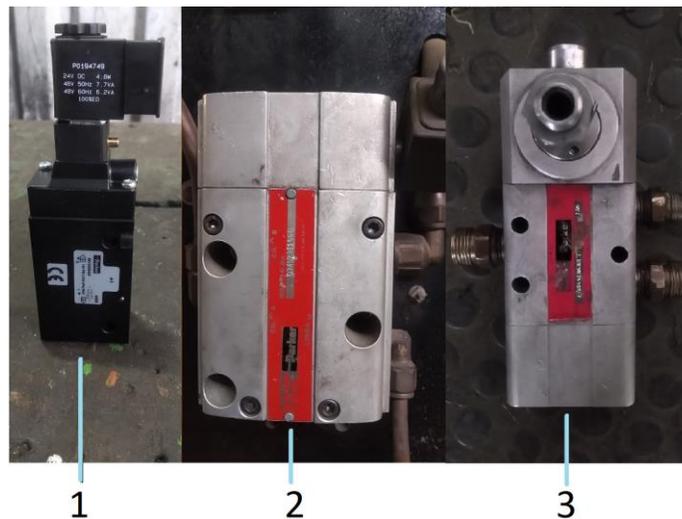


Figura 44. Tipos de electroválvulas. (Hernández, J. 2022).

En la figura 45 se observa que tanto la electroválvula B6 (1) y Directair 6 (2) trabajan de la misma forma, es decir que se alimentan por el puerto representado por una flecha azul, la alimentación hacia el actuador se hace por el puerto representado de verde y el desfogue lo hacen por el puerto representado en naranja. Por otro lado, la electroválvula serie K (3) lo

hace de forma inversa, es decir que se alimenta por la parte de arriba como se representa con la flecha azul, la alimentación hacia el actuador lo hace por el puerto representado por la flecha verde y el desfogue por el puerto representado por la flecha naranja, la electroválvula serie k que cuenta con dos modelos y la diferencia entre un modelo y otro es que una es izquierda y la otra derecha.

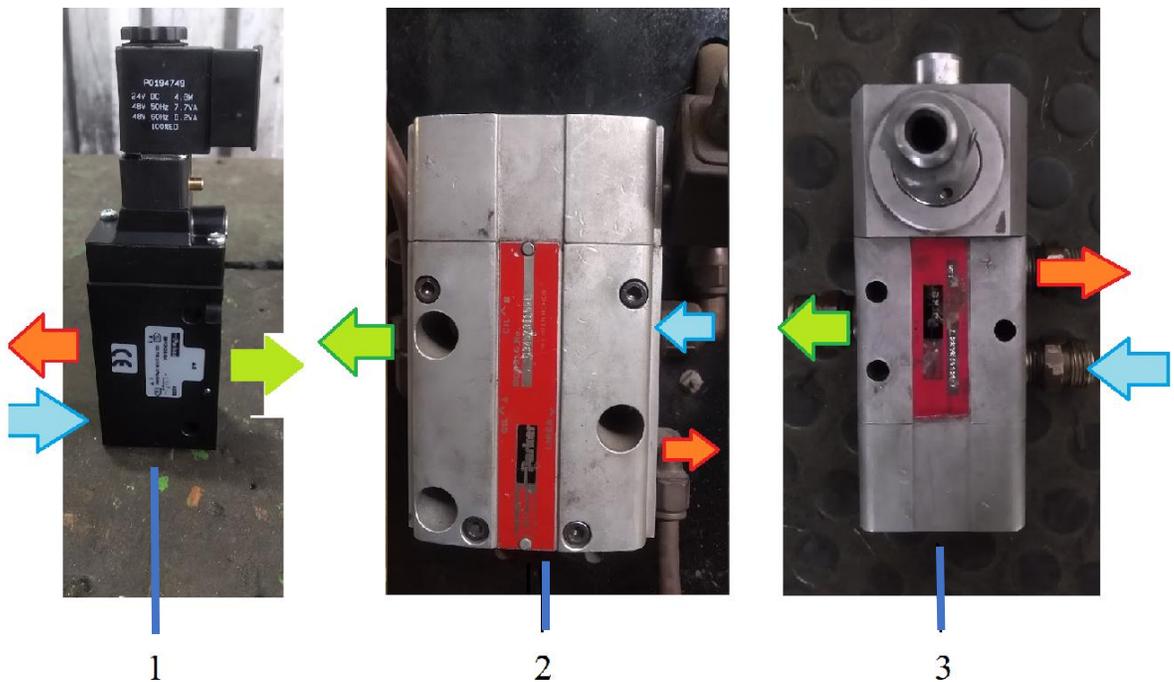


Figura 45. Accionamiento de las electroválvulas. (Hernández, J. 2022).

Al ser normalmente cerradas significa que el aire suministrado no pasa directamente hacia los actuadores neumáticos, si no hasta que sean energizadas, una vez energizadas permiten el paso del aire hacia el actuador, y como consecuencia de la entrada de aire a presión, moverá su vástago hacia el interior o hacia el exterior del cilindro, al realizar esta acción provocará el movimiento de los componentes descritos anteriormente, realizando así la operación de apertura o cierre de las puertas.

### **CAPÍTULO 3. ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA PARA ACCIONAR EL SISTEMA DE APERTURA Y CIERRE DE LAS PUERTAS.**

En el Presente capítulo se analizará la alimentación neumática que es distribuida a través de la tubería de equilibrio y, se hará una síntesis del proceso para conocer cuál es el rol que desempeña cada uno de los componentes involucrados como lo son el motocompresor, el separador de aceite, el secador de aire regenerativo, el tanque principal y el tanque de regeneración, con la finalidad de conocer la secuencia de funcionamiento y alimentación neumática.

Para describir cómo se lleva a cabo la función de alimentación neumática se comenzará analizando la alimentación del motocompresor a la tubería de equilibrio en el material rodante, enfocándose únicamente en el suministro del aire dirigido a la función de accionar el sistema de apertura y cierre de las puertas.

El material rodante actualmente está constituido por 24 trenes como se mencionó, en donde el funcionamiento y los equipos del sistema neumático son similares para todos los modelos.

Es importante recordar que los trenes cuentan con dos carros vagón denominados como M1 y M2, debido a que a lo largo de estos carros y bajo bastidor se encuentran distribuidos los componentes que integran y forman el sistema neumático del material rodante.

Para conocer el funcionamiento neumático que acciona al sistema de puertas se dividirá en las siguientes secciones con el fin de clasificar su funcionamiento.

- Alimentación neumática desde el motocompresor al tanque principal y tubería de equilibrio.
- Alimentación neumática de tubería de equilibrio a equipo neumático de puertas de M1 y M2.

### **3.1. ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA DESDE EL MOTOCOMPRESOR AL TANQUE PRINCIPAL Y TUBERÍA DE EQUILIBRIO.**

Para comprender mejor como se lleva a cabo la generación del aire comprimido y su distribución dentro de la tubería de equilibrio se analizarán los componentes involucrados de forma individual por medio del siguiente subtema denominado “componentes del sistema de alimentación neumática”.

#### **3.1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA.**

Conocer la función de los componentes involucrados como lo son un motocompresor, separador de aceite, secador de aire regenerativo, depósito principal de 250 litros y una válvula de purga automática, tiene como finalidad comprender cómo se integran y cuál es la función dentro del tren para llevar a cabo la función de la alimentación neumática del motocompresor al tanque principal y tubería de equilibrio.

##### ***3.1.1.1 Motocompresor.***

Este sistema involucra un motocompresor rotativo, el cual para todos los modelos de trenes es de tipo de tornillo como el mostrado en la figura 46.

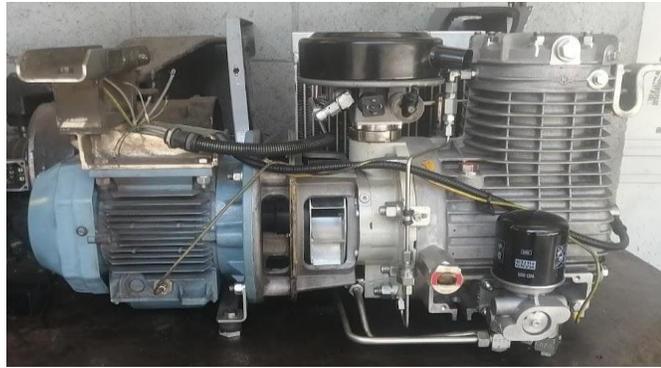


Figura 46. Motocompresor de tipo tornillo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 21 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Este motocompresor está constituido de tres grupos principales: Accionamiento, compresor y acoplamiento/refrigerador, como se puede observar en la figura 47.

El accionamiento es por medio de un motor de corriente trifásica; el compresor lleva el bloque de compresión y está integrado el separador de aceite; y el acoplamiento/refrigerador que es una construcción rígida la cual permite la construcción autoportante del grupo el cual aloja un ventilador radial, el refrigerante está constituido de forma doble, como refrigerador de aire y aceite.



Figura 47. Grupos principales del motocompresor. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 21 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Los tres grupos principales del motocompresor están atornillados, lo que permite ser un grupo compacto autoportante, el cual se fija al tren mediante un bastidor ubicado bajo el bastidor del vagón o salón de pasajeros de la Motriz M2. Para realizar un aislamiento del ruido generado por el grupo compresor, este está compuesto dentro de una carrocería encargada de aislar los sonidos, así mismo para evitar los ruidos provocados debido a vibraciones o el movimiento y para controlar la temperatura del compresor, el revestimiento está unido al grupo compresor mediante elementos elásticos.

Dentro de los grupos que integran al motocompresor se encuentra un separador de aceite así mismo como de una unidad de control de aceite, un bloque compresor, un filtro de entrada, un motor trifásico, un switch de temperatura, un presostato y una suspensión.

El compresor hace la admisión del aire de forma radial y es expulsado a la salida de forma axial a través de aberturas especiales en el cuerpo del bloque de compresión. El volumen de aire entre los dientes estará cambiando continuamente debido a la rotación de los rotores, esto se lleva a cabo cuando la abertura de admisión esté libre provocando la aspiración del aire y cuando esté tapado, es cuándo ocurrirá la compresión del aire, debido a la disposición de sus rotores el cual giran en forma paralela, pero en sentidos contrarios lo que enviará el aire al extremo opuesto con un flujo continuo de aire a presión.

Para lograr mantener el sistema hermético entre los flancos de los dientes de los rotores y hacia el cuerpo se inyecta aceite en el compresor, además este último absorbe la mayoría del calor generado durante la compresión.

Al no existir piezas de tipo vaivén y debido a su composición, este sistema permite un bajo nivel de ruido, bajos niveles de vibraciones y una generación de aire comprimido sin pulsaciones durante su funcionamiento.

El motocompresor estará comandado por el presostato mando del compresor el cual tiene los parámetros de operación de 8 a 10 bar, esto quiere decir que la presión nominal dentro de la tubería de equilibrio estará entre los 8 a 10 bar, cuando se encuentre la presión debajo de los 8 bar es cuando el compresor empieza su ciclo de trabajo y parará una vez llegue a los 10 bar.

Características de operación:

- Límites de conmutación por el control de presión a bordo: 8 bar para encendido, 10 bar para apagado.
- Revoluciones del eje: 3500/min máximo, 2500/min mínimo.
- Caudal volumétrico: 800 litros/min  $\pm$  6% (Con máximo de revoluciones).
- Temperatura límite del compresor: 110°C.
- Temperatura máxima del aceite: 83°C.

### ***3.1.1.2 Separador de aceite.***

El buen funcionamiento del separador de aceite es de vital importancia para garantizar un funcionamiento correcto y prolongar la vida útil de los equipos neumáticos en el sistema de aire comprimido ya que este permite la limpieza del mismo aire que es suministrado al tren.

La misión del separador de aceite es liberar la mayor cantidad de partículas de aceite y agua del aire comprimido que va arrastrando del compresor y, estos son enviados a la atmósfera a través de una válvula de purga automática una vez que el compresor ha parado.

El separador de aceite está conformado por un depósito hermético dividido en dos mitades unidos entre sí por tornillos a través de una brida. La entrada de aire se encuentra en la mitad inferior e internamente contiene una placa deflectora el cual va desviando el aire que va ingresando de forma tangencial y lo pone en movimiento circular. En la pared inferior están siendo lanzadas las partículas pesadas contenidas en el aire comprimido, esto debido a la acción de la fuerza centrífuga y fluyendo hacia el fondo del depósito (colector).

El aire comprimido pasa a través de unos anillos rasching, en donde sufre diversos cambios de turbulencia y de dirección, por lo cual partículas de agua y aceite sufren choques sobre las superficies relativamente grande de los anillos rasching, lo cual provoca que estas partículas de agua y aceite se condensa uniéndose entre sí formando gotas de mayor tamaño y posteriormente cayendo al fondo del depósito de la mitad inferior, esto sucede antes de pasar al secador de aire.

El aceite y el agua almacenados en el depósito de la mitad inferior son expulsados hacia la atmósfera una vez que el compresor para, esto lo hace por medio de un silenciador y un auto purgador, permitiendo al secador estar listo para su próximo proceso al arranque del compresor.

### ***3.1.1.3 Secador de aire regenerativo.***

El aire comprimido a la salida del compresor y del separador de aceite presenta humedad, este aire húmedo provoca corrosión en los equipos neumáticos, para evitar dañarlos y prolongar su vida útil es necesario hacer pasar el aire comprimido a través de un secador de aire regenerativo, como el mostrado en la figura 48.

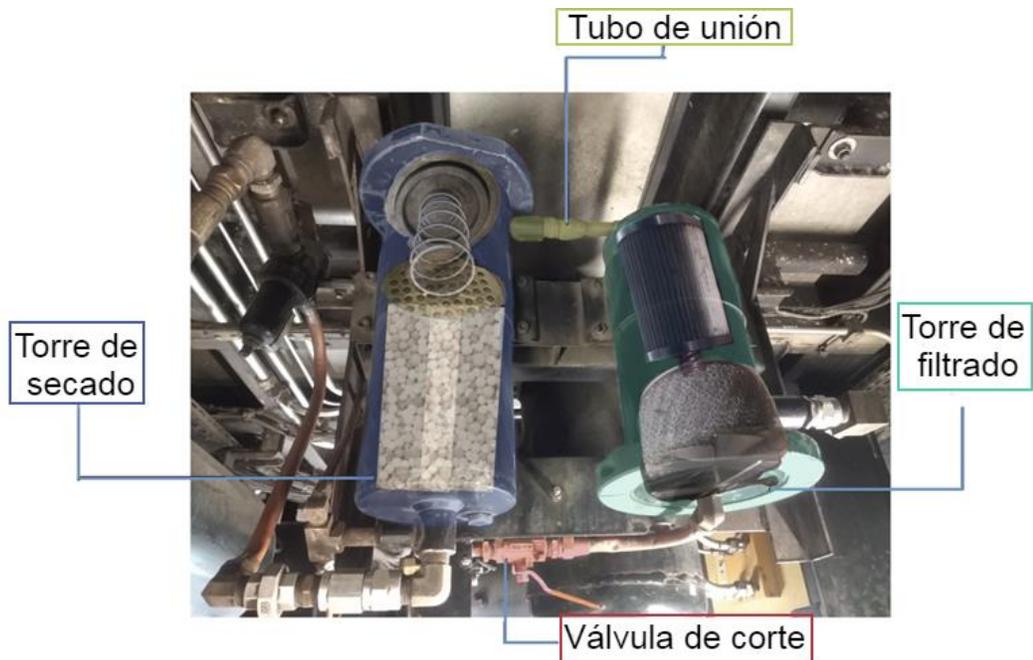


Figura 48. Partes del secador de aire regenerativo. (Hernández, J. 2022).

El secador de aire regenerativo da inicio a su operación cuando el compresor está trabajando y pasa el aire por la torre de filtrado en donde introduce el aire suministrado por el compresor, en la cámara de decantación ubicada en la parte inferior del recipiente de filtrado se produce la descompresión y desaceitado del aire, posteriormente el aire atraviesa un filtro de acero inoxidable con la finalidad de retener el polvo, las gotas de agua y el aceite, una vez realizado lo anterior y con la finalidad de complementar la retención de la mayor cantidad de partículas perjudiciales y que acortan la vida del desecante, el aire pasa por un filtro de cartucho con sistema de sello estanco.

Terminado el ciclo en la torre de filtrado el aire filtrado pasa a la torre de secado desprendiendo a su paso vapor de agua cuando circula entre las esferas de alúmina, en donde un resorte mantiene compacto el material desecante para evitar que se vea afectado el funcionamiento del material desecante por la vibraciones y movimiento del tren, es aquí donde se realiza la fase de adsorción.

La regeneración de alúmina se efectúa en cada paro del compresor por barrido de aire seco. El barrido de aire seco lo hace de forma inversa a cómo trabaja cuando el compresor está en funcionamiento, mientras está en servicio el compresor el aire sigue la siguiente trayectoria dentro del secador de aire: Primero pasa por la torre de filtrado, después a la torre de secado y simultáneamente al tanque principal de almacenamiento y al tanque de regeneración.

Cuando el compresor termina con su ciclo de trabajo, el aire almacenado en el tanque de regeneración (Figura 49) sigue con la siguiente trayectoria: Pasa por la torre de secado en sentido inverso, por la torre de filtrado en sentido inverso, y finalmente, el aire se libera al energizarse la electroválvula Directair 6 que una vez accionada conmuta de su posición normalmente cerrada a la posición abierta, lo cual permite la eliminación de los residuos arrastrados en el barrido de aire seco y almacenados en la cámara de decantación. Al realizarse la fase de regeneración para evitar que el aire se regrese al tanque principal y al compresor cuenta con 2 válvulas de retención.

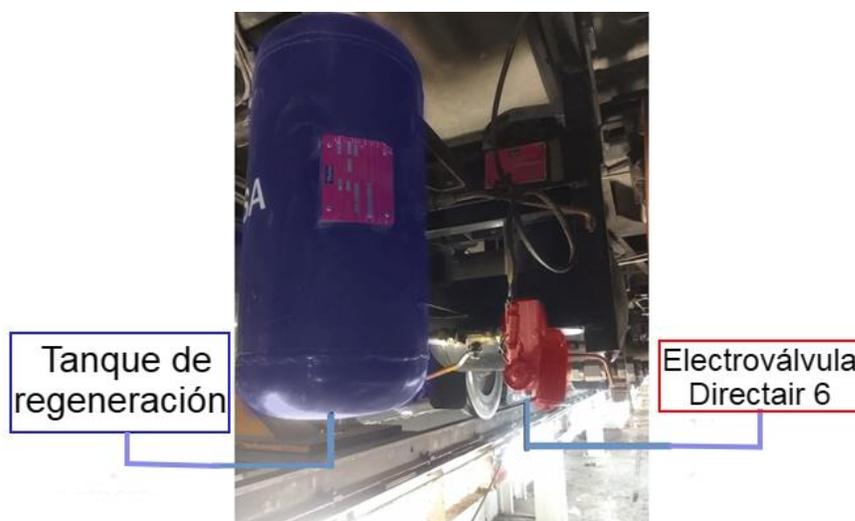


Figura 49. Tanque de regeneración y electroválvula. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

El trabajo realizado por el secador de aire mencionado anteriormente da a su salida aire comprimido seco y, el agua separada del aire comprimido es expulsada hacia la atmósfera cuando el compresor hace su paro por medio de un silenciador controlado por una electroválvula del mismo secador. El objetivo de realizar el barrido en el elemento secante de la torre de secado y filtrado por medio de aire seco almacenado en el depósito de 25 litros es para que esté seca para el próximo arranque del compresor.

Los parámetros de operación del secador de aire son los siguientes:

- Capacidad:  $730 \text{ l/min}$  -  $1800 \text{ l/min}$ .
- Rango de presión manométrica:  $6.8 \text{ bar}$  a  $10 \text{ bar}$ .
- Presión manométrica de presión:  $8.2 \text{ bar}$  nominal.
- Temperatura máxima a la entrada:  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Grado de humedad a la entrada: 100% humedad
- Grado de humedad a la salida:  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Por debajo de la temperatura ambiente aproximadamente 4% de humedad relativa.
- Temperatura ambiente:  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $600 \text{ m}$  sobre el nivel del mar.

#### ***3.1.1.4 Depósito principal de 250 litros.***

El aire comprimido proveniente del secador de aire regenerativo, una vez seco se almacena en el tanque principal (ver figura 50) y, a través de la tubería de equilibrio será distribuido a todos los equipos del sistema neumático.

Al depósito principal se encuentra conectada una válvula de aislamiento manual que a su vez conecta al presostato del compresor, y como se comentó anteriormente está ajustado de 8 a 10 bar el cual es el rango de operación del compresor (arranque y paro). Si en el circuito

de control del compresor se comanda la posición directa, el presostato del compresor, no tiene el control sobre él, y la presión en el tanque principal se incrementará y al llegar a los 12 bar se dispara la válvula de seguridad, que se encuentra integrada en una línea de salida del compresor.



Figura 50. Tanque principal de 250 litros. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

#### ***3.1.1.5 Válvulas de purga automática.***

Las válvulas de purga automática funcionan con aire comprimido y son controladas por una electroválvula que al paro del compresor es accionada para expulsar los residuos de agua y aceite contenido y, vuelven a cerrarse al arranque del compresor.

Mientras el compresor se encuentra trabajando, la válvula de purga automática se encuentra desenergizada y capturando los residuos de agua y aceite, así como partículas de polvo y suciedad a la salida del compresor que posteriormente será distribuido a un secador de aire regenerativo. Una vez que el compresor hace su paro, la válvula de purga automática tienen como objetivo expulsar hacia la atmósfera el agua y el aceite condensados que fueron retenidos en el separador de aceite y el tanque principal. Al enviar los condensados a la atmósfera pasan a través de los silenciadores, con el fin de amortiguar el ruido producido al desfogue.

### 3.1.2 DISTRIBUCIÓN NEUMÁTICA PARA LA ALIMENTACIÓN.

Una vez visto cómo se involucran los componentes principales y cuál es la función que cumplen dentro de la distribución neumática, ahora para entender cómo se lleva a cabo el funcionamiento de alimentación del motocompresor al tanque principal y a la tubería de equilibrio se explicará de forma secuencial, con el objetivo de ver el proceso de trabajo.

Con la finalidad de explicar de una forma clara, cómo es que se lleva a cabo la secuencia de alimentación se hizo el diagrama simplificado de la alimentación neumática desde el compresor al tanque principal y tubería de equilibrio como se muestra a continuación (Figura 51).

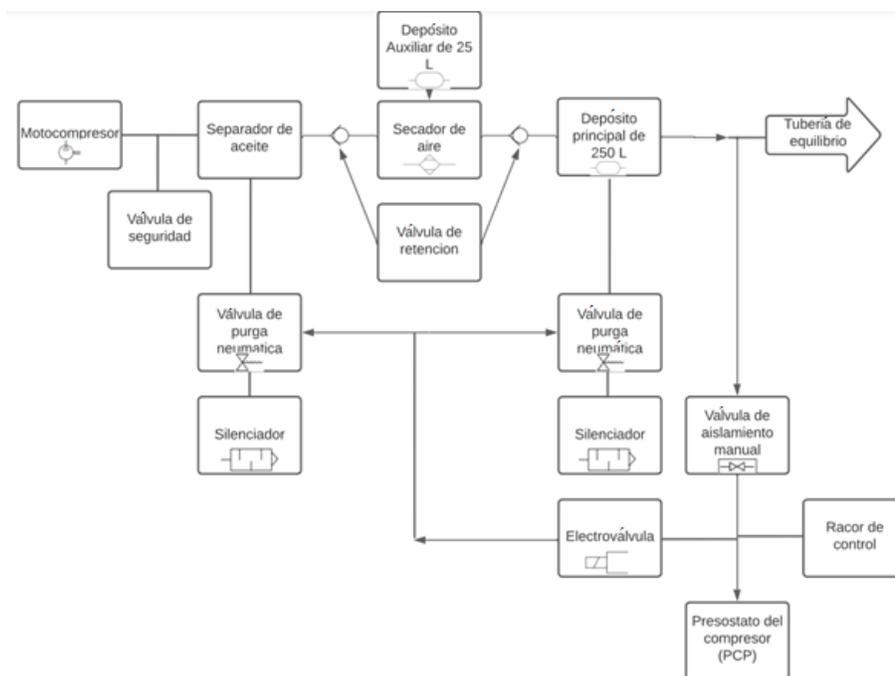


Figura 51. Alimentación neumática desde el motocompresor al tanque principal y tubería de equilibrio (Delgadillo, s.f).

Del diagrama se observa que el aire comprimido es obtenido del equipo motocompresor tipo tornillo mostrado en la figura 46, posteriormente se le retiran partículas de aceite y agua

por medio del separador de aceite, a la salida del separador de aceite el aire es dirigido al secador de aire regenerativo mostrado en la figura 48, al aire comprimido se filtra y se le retira la humedad y, finalmente el aire seco es almacenado en un tanque principal de 250 litros y llena el tanque auxiliar del secador de aire de 25 litros, mostrados en las figuras 50 y 49 respectivamente.

El presostato del motocompresor (PCP) se acciona y manda su paro al llegar la presión a 10 bar, y automáticamente una electroválvula permite el paso del aire para que se accionan las válvulas de purga automática tanto del separador de aceite como la del tanque principal, enviando a la atmósfera los condensados a través de un silenciador. Una vez el compresor está en paro, la electroválvula del secador de aire mostrada en la figura 49 envía a la atmósfera los condensados retenidos y, permite que se inicie el proceso de regeneración del elemento secante (alúmina) del secador, este proceso consiste en hacer circular en sentido inverso al aire seco almacenado en el depósito auxiliar de 25 litros hacia la torre donde se encuentra alojada la alúmina.

El racor de control con auxilio de la válvula de aislamiento manual, se utilizan para conectar un manómetro en forma rápida, para verificar que la presión en el presostato del compresor se encuentre ajustada dentro de los límites de paro y arranque (8 a 10 bar), es importante resaltar que el presostato del compresor no recibiría la referencia de la presión del tanque principal y, el motocompresor estaría trabajando en forma constante si no se tiene cuidado de dejar abierta la válvula de aislamiento manual, ya que de hacer lo contrario y, en consecuencia se incrementa la presión a más de 10 bar y al llegar a 12 bar se accionará la válvula de seguridad.

### **3.2. ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA DE TUBERÍA DE EQUILIBRIO A EQUIPO NEUMÁTICO DE PUERTAS DE M1 Y M2.**

Una vez comprendido cómo es que se lleva a cabo la alimentación del aire comprimido a la tubería de equilibrio, ahora es posible explicar cómo el aire es dirigido para comandar las electroválvulas y los cilindros neumáticos para el accionamiento ya sea de apertura o cierre del mecanismo de puertas.

#### **3.2.1. ELEMENTOS DE DISTRIBUCIÓN Y ACCIONAMIENTO DEL MECANISMO DE PUERTAS.**

Para comprender cómo es que se lleva a cabo esta función de apertura y cierre del mecanismo de puertas, se explicará la función de sus componentes principales como lo son las electroválvulas direccionales y los actuadores neumáticos (cilindros neumáticos).

##### ***3.2.1.1. Operación de la electroválvula.***

Para comandar el accionamiento ya sea de cierre o apertura se hace por medio de electroválvulas las cuales se hace uso de dos, una comanda la apertura y otra comanda el cierre.

Las electroválvulas son diferentes entre los modelos TE-90, TE-95 (2) y TE-06, TE-12 (1) así como las electroválvulas que comandan la puerta del operador (3) como se observó en la figura 37, no obstante, el principio de funcionamiento es el mismo.

Para ejemplificar el funcionamiento de la electroválvula se hará con las electroválvulas de los modelos TE-06, TE-12 que son serie B6V2ADB49A de Parker normalmente cerrada como se muestra a continuación en la figura 52.

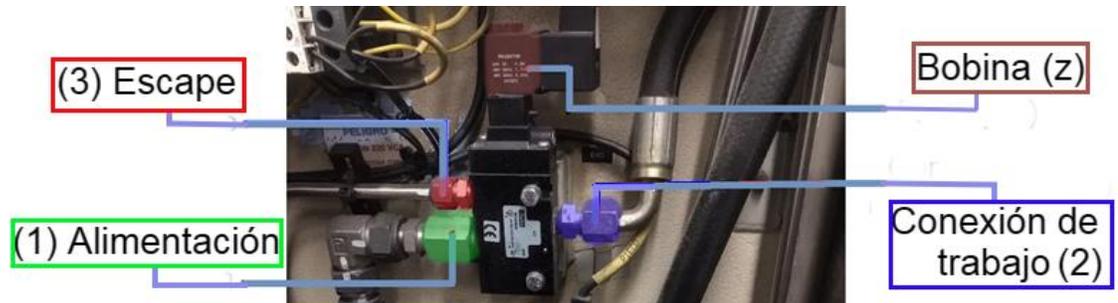


Figura 52. Conexión de trabajo de Electroválvula B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 27 de mayo de 2022, Huipulco CDMX).

Este tipo de electroválvulas para comandar el funcionamiento de apertura y cierre trabajan de forma asíncrona, es decir, mientras una está energizada la otra permanecerá desenergizada para así permitir que el actuador (cilindro mecánico) pueda realizar el movimiento del vástago hacia donde se necesite realizar el trabajo y la parte contraria pueda desfogar para evitar contrapresiones.

La alimentación proviene de la tubería de equilibrio y es controlada a 6 bar por un regulador de presión ubicado bajo bastidor de M1 y M2 (Ver figura 54). Regulador de presión), y esta es comunicada a la electroválvula por el puerto de entrada 1, el cual está marcado con color verde como se muestra en la figura 53.



Figura 53. Alimentación neumática a electroválvula. (Hernández, J. 2022).



Figura 54. Regulador de presión. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 28 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Por consiguiente, la alimentación al actuador (puerto 2) y el desfogue (puerto 3) queda indicado como se muestra en la figura 55, donde se observa que en color azul se da la alimentación al actuador y en color rojo se muestra el desfogue.



Figura 55. Circuito neumático de la electroválvula. (Hernández, J. 2022).

Asimismo, si lo que se desea es comandar la apertura de la puerta lo que se debe de hacer es accionar la válvula de apertura y desenergizar la electroválvula de cierre, entonces lo que sucederá es lo mostrado en la figura 56.



Figura 56. Función de electroválvula como apertura de puertas. (Hernández, J. 2022).

De la figura 56 se observa que la electroválvula localizada en la parte inferior del frente de articulación se encuentra energizada, y debido al accionamiento mediante una señal eléctrica, se crea un campo magnético el cual atrae el émbolo, cuando esto sucede el aire proveniente de la tubería de equilibrio actuará como presión piloto, lo que desplaza el vástago y permitirá la conmutación de su segunda posición “abierta”, esto permitirá que el aire proveniente de la tubería de equilibrio pasa hacia el cilindro neumático (puerto 2) y deja cerrado el puerto 3 de desfogue, mientras que en la electroválvula de cierre ocurre lo contrario, al no estar energizada la bobina el muelle fuerza al vástago para impedir el flujo de aire del puerto de alimentación (puerto 1), por lo que se mantiene cerrado, lo que permite que el aire del cilindro pueda escapar hacia la atmósfera por el puerto 3 de desfogue.

Por otro lado, si lo que se desea es comandar el cierre de las puertas el proceso ocurriría en forma inversa ahora quedando la válvula mostrada en la parte superior energizada y la mostrada en la parte inferior desenergizada.

### 3.2.1.2 Operación de cilindro neumático.

El cilindro neumático ocupado en los trenes es de doble efecto y dos pasos, aunque los ocupados tanto para los modelos TE-90, TE-95(1) y TE-06, TE-12(2) son modelos distintos como los mostrados en la figura 14, su principio de funcionamiento es el mismo.

Este tipo de cilindros tienen un funcionamiento sencillo y, la presión de aire suministrado para accionar el vástago ya sea para abrir o cerrar las puertas, será comunicado por la electroválvula correspondiente el cual dictará el sentido de desplazamiento del vástago, de la figura 57 se puede observar que el cilindro cuenta con dos puertos, en dichos puertos será suministrado o expulsado el aire dependiendo de la acción a realizar, estos puertos se encuentran comunicados directamente a las electroválvulas y, se puede observar en color azul el puerto comunicado a la electroválvula de apertura y en rojo el puerto comunicado a la electroválvula de cierre, y como en dicha disposición se realiza la carrea del vástago.

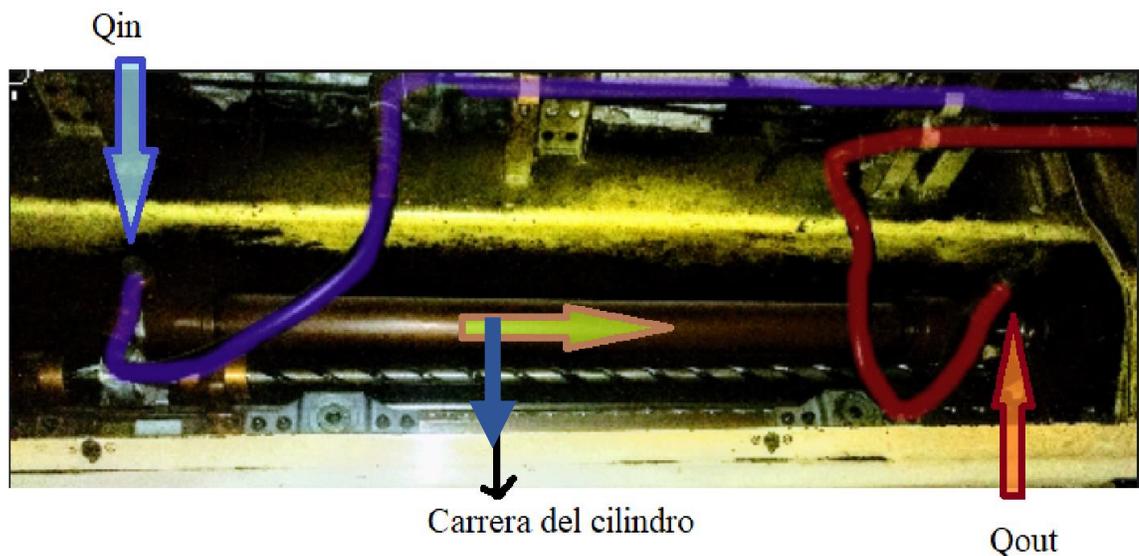


Figura 57. Cilindro neumático. (Hernández, J. 2022).

Cuando se quiere comandar el cierre de las puertas el sentido del aire será inverso, la electroválvula de cierre se energizará y permitirá el paso del aire comprimido hacia el puerto que hará que el vástago se introduzca dentro del cilindro, en este momento el otro puerto queda conectado a la atmósfera por medio del escape de la electroválvula como se muestra en a figura 58.

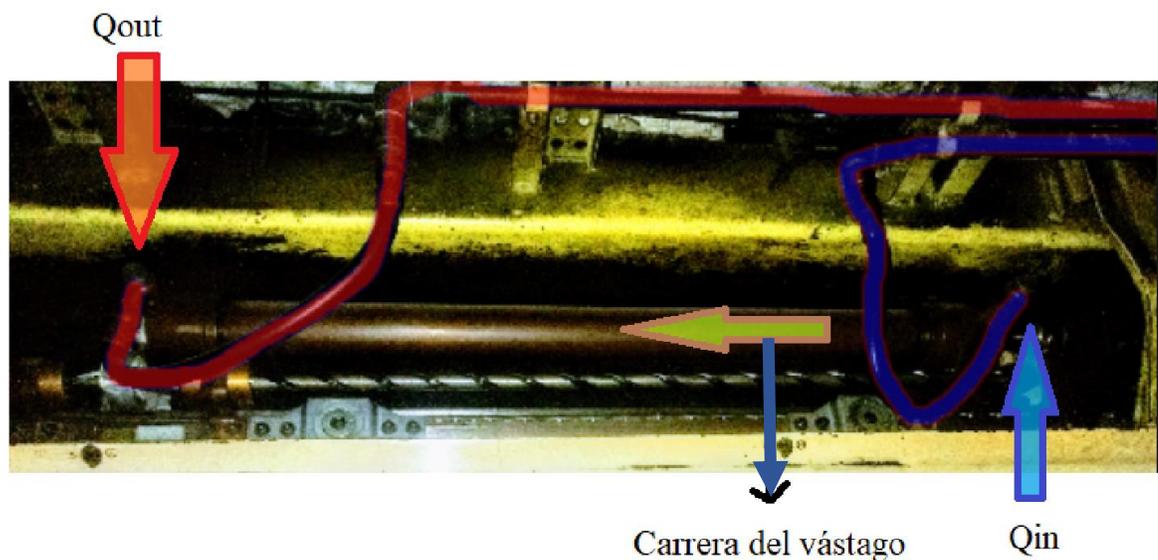


Figura 58. Actuador en cierre de puertas. (Hernández, J. 2022).

El aire atrapado entre la tapa y el vástago forman un colchón de aire que disminuye sensiblemente la velocidad de cierre sin provocar choque o rebote la cual se conoce como fase amortiguada y el aire es liberado poco a poco a través de un orificio calibrado lo cual asegura una velocidad lenta.

Lo mencionado anteriormente se puede ver representado en la figura 59, donde la alimentación de la electroválvula para comandar el cierre de puertas, provoca que el vástago se introduzca en el cilindro y durante la carrera de retroceso, en la parte trasera debido a una contra presión creada por el émbolo sumado a que un orificio calibrado disminuye la velocidad de salida del aire, al hacerlo pasar por un orificio con un diámetro menor, provoca

que el actuador realice un segundo paso, esto responde al principio de que la velocidad de salida del aire, es igual a la división del caudal sobre el área del pistón, entonces al reducir el área por donde saldrá el aire comprimido, la velocidad se verá reducida y a este efecto igual se le conoce como la fase amortiguada, representada de color verde.

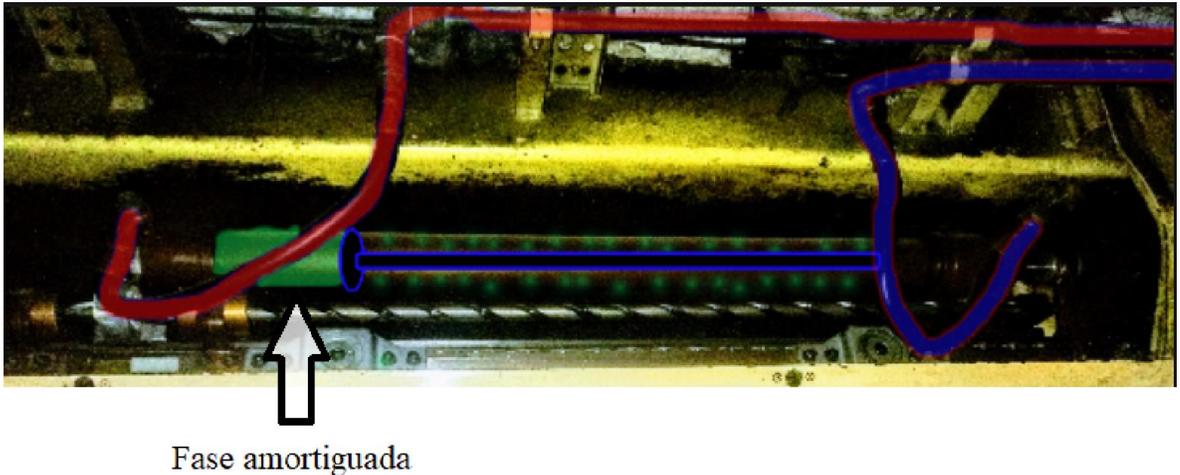


Figura 59. Representación de la fase amortiguada. (Hernández, J. 2022).

Para la apertura de las puertas se realiza lo mismo, pero en sentido inverso.

### 3.2.3 ALIMENTACIÓN NEUMÁTICA A SISTEMA DE PUERTAS.

Una vez visto como se involucran los componentes principales, se verá cuál su función en conjunto y cómo trabajan para cumplir con la distribución neumática al sistema de puertas, en este apartado se explicará de forma secuencial cómo es que se realiza este proceso con la finalidad de comprender al sistema como un conjunto.

Con la finalidad de explicar de una forma clara cómo es que se lleva a cabo la secuencia de alimentación, se hizo el diagrama simplificado de la alimentación neumática desde la tubería de equilibrio a sistema neumático de puertas como se muestra en la figura 60.

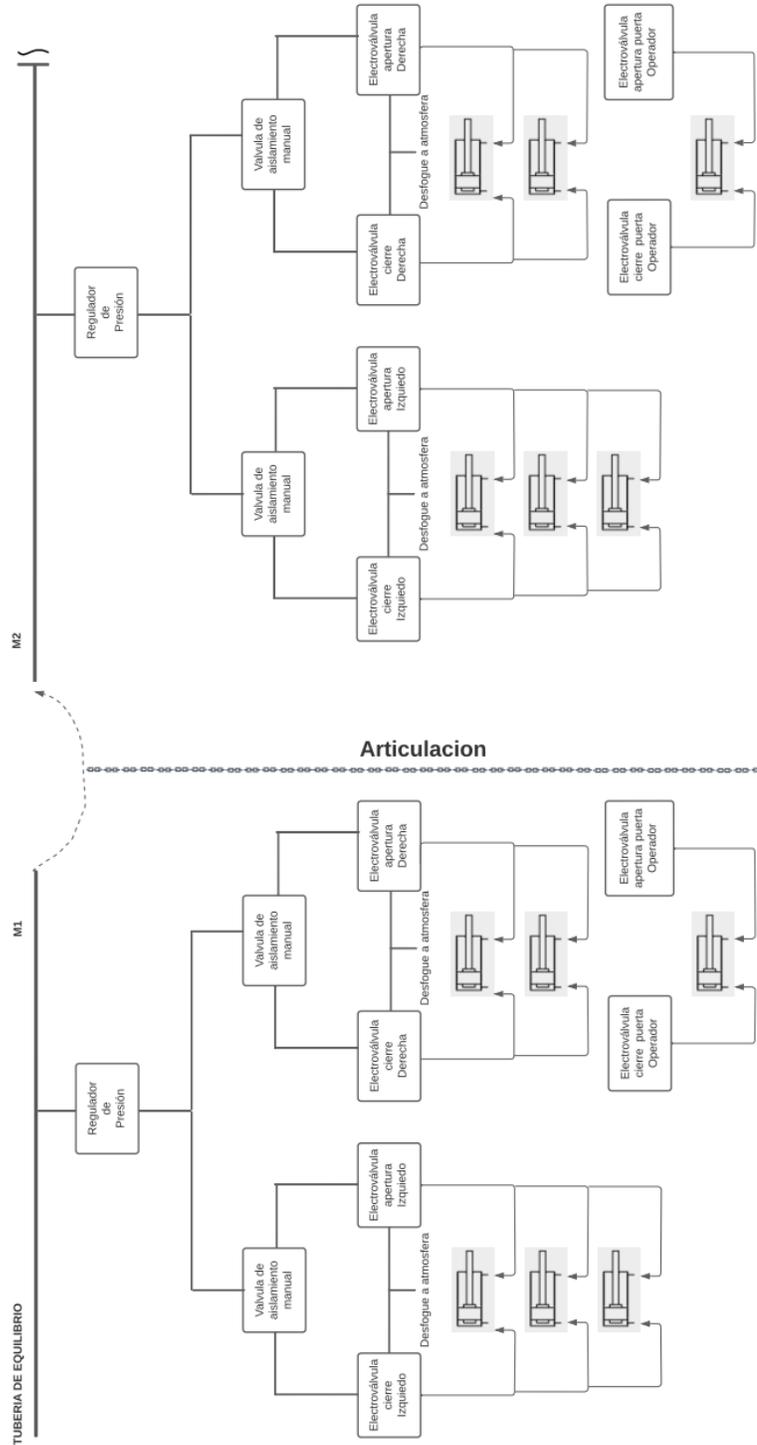


Figura 60. Alimentación de tubería de equilibrio a sistema neumático de puertas de M1 y M2 (Delgadillo, s.f).

Del diagrama de alimentación de tubería de equilibrio al sistema neumático de puertas, se observa que se cuenta con 6 puertas de dos hojas por cada lado del tren para el acceso al público, un cilindro neumático de doble paso y dos tiempos permite el accionamiento de cada puerta permitiendo en su accionar un control suave, pero firme cuando el tren se encuentra en operación, si el operador necesita descender del tren, en caso de una avería o emergencia y para no arriesgar la integridad del público usuario, es necesario asegurar el cierre de todas las puertas del salón de pasajeros, por lo cual le es posible comandar desde la cabina en que lleve los mandos, la apertura de la primera puerta del lado derecho ya sea de M1 o M2. De acuerdo con el andén de las estaciones y desde la cabina que lleva los mandos el operador determinará el lado de servicio de las puertas, así mismo puede comandar el anuncio de cierre, el cierre o la apertura de las puertas.

El aire comprimido proveniente de la tubería de equilibrio la cual es regulada a una presión de 6 bar por un regulador de presión ubicado bajo el bastidor de M1 y M2 es la utilizada para el funcionamiento de las puertas.

Si el operador lleva los mandos por la cabina M1 del tren, y determina poner en servicio las puertas del lado derecho, automáticamente se comanda el cierre de las puertas izquierdas de M1 y el cierre de las puertas derechas de M2, para cumplir con este objetivo se excita la bobina de la electroválvula de cierre izquierdo a la misma vez que la de apertura derecha de M1, mientras que por M2 se excita la bobina de cierre derecho a la vez que se excita la de apertura izquierda lo que permite el paso del aire comprimido proveniente del regulador de presión hacia los tres cilindros neumáticos de puertas de cada carro y provocando el cierre respectivo. Retomando el ejemplo anterior cuando el operador manda el cierre de las puertas derechas se cierran las puertas derechas de M1 y las izquierdas de M2, lo anterior es posible

al excitar la bobina de la electroválvula de cierre derecho de M1 y la de cierre izquierdo de M2.

Es necesario que eléctricamente se encuentren alimentadas en forma constante las bobinas de las electroválvulas de cierre de lado derecho e izquierdo de M1 y M2 para que las 12 puertas de acceso del tren se encuentren cerradas y con sostenimiento de cierre.

Continuando con la operación de las puertas desde la cabina de M1, si el tren no se encuentra en movimiento en automático se abrirán las puertas del lado derecho de M1 y las izquierdas de M2 esto cuando se comanda la apertura de puertas, esto se logra mediante la corriente eléctrica que alimenta a la bobina de las electroválvulas de apertura derecha de M1 e izquierda de M2 con lo que se logra la apertura de las puertas.

Si el operador decide utilizar la puerta de operador, desde su cabina debe comandar el selector de apertura el cual permite el funcionamiento de las electroválvulas de apertura y cierre de las puertas del operador. Cuando ejecuta esta acción a la electroválvula de cierre se le corta la alimentación eléctrica con lo que se pierde el sostenimiento de cierre y se alimenta la electroválvula de apertura, con lo que se logra la apertura de la puerta, cuando el selector de apertura de la puerta de operador es regresado a su posición normal la puerta de operador se cierra automáticamente al ocurrir inversamente el procedimiento de apertura antes mencionado.

## **CAPÍTULO 4. PUESTA EN MARCHA.**

En el Presente capítulo se integrará lo visto en los capítulos dos y tres de este trabajo, con el objetivo de explicar de forma clara y secuencial como se involucran todos los componentes neumáticos y mecánicos para accionar el sistema de apertura y cierre de las puertas de pasajeros del tren ligero.

Se explicará el funcionamiento a partir de cómo se lleva el proceso desde que el motocompresor entra en marcha para alimentar la tubería de equilibrio y dar paso a que las electroválvulas distribuyan el aire comprimido para el accionamiento de las puertas mediante el cilindro neumático y obtener como resultado la apertura o cierre de las puertas del salón de pasajeros.

### **4.1 INICIO DEL PROCESO DE ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA.**

Todo inicia con el motocompresor el cual absorbe el aire del ambiente de forma radial y logra la compresión mediante unos rotores helicoidales que al estar rotando cambian el volumen de aire entre los dientes cuando ambas aberturas (admisión y expulsión) se encuentran cerradas, la compresión se hace con ayuda de un aceite que sirve además de lubricar, para mantener hermetizada la rendija de los rotores y expulsar el calor generado en la compresión, el aire comprimido simultáneamente es transportado hacia la abertura de salida, y cuando los rotores dejan dicha abertura libre el aire comprimido es expulsado de forma axial hacia la tubería de equilibrio. El arranque y paro del compresor es controlado por un presostato que tiene un rango de presión de trabajo de 8 a 10 bar, lo que significa que cuando está por debajo de sus parámetros de operación (8 bar) se activará y comandara el arranque del compresor, parará una vez llegue a la presión de 10 bar en la tubería de equilibrio.

Al mismo tiempo que el compresor está trabajando el aire pasa por un separador de aceite, el cual contiene una placa deflectora que va desviando el aire que va ingresando de forma tangencial, obligándolo a fluir en un patrón circular y por medio de la fuerza centrífuga las partículas de agua y aceite contenidas en el aire chocan sobre las paredes del recipiente haciéndolas fluir hacia el fondo de la taza, mientras que las partículas de aire que siguen girando pasan por un elemento filtrante donde se quedan retenidas partículas sólidas contaminantes logrando quitar excedentes de agua y aceite que queden a la salida del compresor, posteriormente pasará a una unidad de mantenimiento la cual está compuesta en primera instancia por un secador de aire regenerativo.

El secador de aire limpiará y mantendrá seco el aire neumático para evitar daños por corrosión debido a la presencia de humedad por medio de dos torres, una de filtrado en donde se produce la descompresión y desaceitado del aire en la cámara de decantación, en primera instancia el aire pasa por un filtro de acero inoxidable para retener el polvo y gotas de agua y aceite, posteriormente pasa por un filtro de cartucho de sello estanco con la finalidad de retener la mayor cantidad de partículas perjudiciales y que acortan la vida del desecante, cuando el aire recorre la primera torre pasa a la segunda torre la cual es de secado por absorción el cual usa como agente desecante la alúmina (Figura 61).



Figura 61. Componentes iniciales. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de agosto y 3 de junio de 2022 respectivamente, Huipulco CDMX).

El aire al salir del secador de aire regenerativo es almacenado en el depósito principal de 250 litros en conjunto con el tanque de regeneración del secador de aire, el aire almacenado en el depósito principal será distribuido a través de la tubería de equilibrio, esta tubería de equilibrio no solo alimenta el sistema de puertas, el aire comprimido es destinado a diversos componentes como lo son, claxon neumático, suspensión secundaria, sistema de puertas, pantógrafo y cilindros de frenos.

Por otra parte el aire almacenado en el tanque de regeneración entrará en acción una vez el compresor pare, al paro del compresor la electroválvula del secador se accionará, con lo cual energizará su bobina para atraer su émbolo y, usará la misma presión contenida en el tanque de regeneración para hacer su pilotaje, permitiendo el paso del aire contenido en el tanque hacia las torres de secado y filtrado de forma inversa, permitiendo de este modo la regeneración por barrido de aire seco, al hacer el barrido por aire seco en forma inversa las partículas de agua y aceite son expulsadas por medio de un silenciador conectado al escape de la electroválvula del secador de aire, de esta forma el secador quedará listo para el siguiente arranque del compresor.

La segunda parte de la unidad de mantenimiento se da una vez el aire es almacenado libre de humedad y es distribuido a través de la tubería de equilibrio, por lo cual el aire destinado al sistema de puertas pasa por un regulador de presión, regulado a 6 bar, y finalmente pasa en los modelos TE-06 y TE-12 por un lubricador ubicado bajo los bastidores de M1 y M2. Mientras que para los modelos TE-90 y TE-95 la lubricación se hace de forma manual, la parte de lubricación es la fase final de la unidad de mantenimiento para ser distribuido a las electroválvulas, ya sean serie “B6” para los modelos TE-06 y TE-12 o serie “K” y Directair 6 para los modelos TE-90 y TE-95 como se muestra a continuación en la figura 62.



Figura 62. Electroválvulas y regulador de presión. (Hernández, J. 2022).

#### **4.2. CONTROL DE PUERTAS.**

Como se describió el aire proveniente de la tubería de equilibrio es dirigido por medio de unas electroválvulas de solenoide de 3 vías y 2 posiciones con retorno por resorte, las cuales son normalmente cerradas. La selección y disposición de las electroválvulas son con la finalidad de controlar el aire dirigido para la apertura y el cierre de forma segura, en cuanto a su disposición, se encuentran ubicados 4 juegos de electroválvulas en el frente de articulación del tren por vagón, de las cuales se necesitan 2 electroválvulas para controlar 3 mecanismos de puertas por cada lateral del tren cuya principal función es dirigir el aire comprimido a los cilindros de puertas. En cuanto las electroválvulas para la puerta del operador se encuentran ubicadas del lado adyacente al mecanismo de puertas en la primera puerta del lado derecho de cada tren.

La disposición normalmente cerrada de las electroválvulas, da la oportunidad de abrir o cerrar las puertas de forma manual y voluntaria por un operador cuando no se están tomando mandos, de lo contrario al estar tomados los mandos las puertas contrarias a las puertas en servicio se mantendrán cerradas con sostenimiento de cierre, al no tener mandos las electroválvulas se encuentran desenergizadas e impide el paso del aire comprimido hacia los

cilindros neumáticos, lo que conlleva a que el cilindro esté en comunicación continua con el puerto de desfogue de la electroválvula, el cual permitirá abrir o cerrar las puertas de forma manual al no tener una contrapresión que impida su movimiento.

Un sistema de seguridad incorporado en el sistema de puertas es el sostenimiento de puertas, el cual consiste en que suponiendo la puesta en servicio de las puertas derechas de M1 e izquierdas de M2, las electroválvulas de cierre izquierdo de M1 y las electroválvulas de cierre derecho de M2 se encontraran energizadas, impidiendo que el público usuario pueda hacer la apertura de forma manual o que se abran accidentalmente cuando alguien se recargue en ellas.

Para que las electroválvulas dirijan el aire comprimido para realizar la acción de abrir o cerrar las puertas se debe de hacer desde la cabina que tiene los mandos ya sea por M1 o M2, una vez seleccionado el mando del tren el operador decide que puertas poner en servicio en función del andén de pasajeros para permitirá el descenso y ascenso por medio del conmutador de puertas KP, este conmutador cuenta con cuatro posiciones, las cuales son: Servicio de puertas derechas, servicio de puertas izquierdas o servicio de ambas puertas y una posición neutra como se muestra en la figura 63.



Figura 63. Conmutador de puertas. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 30 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

Las señales dadas por el Operador a la hora de tomar los mandos y decidir qué puertas poner en servicio mediante el conmutador KP y, a la hora de presionar los botones de apertura y cierre de puertas es monitoreado por la UPS, el cual será el encargado por medio de relevadores de convertir las pulsaciones en señales de corriente para accionar las bobinas de las electroválvulas.

Si los mandos son tomados desde M1 y se desean abrir las puertas izquierdas, el aire comprimido proveniente del regulador de presión, se abrirá paso por la electroválvula de apertura izquierda al energizar el solenoide, lo cual atraerá su émbolo a la parte superior y permitirá el desplazamiento del vástago para hacer la conmutación a su posición “abierta”, mientras que la electroválvula de apertura permanecerá desenergizada (Como se vio en la figura 56). Por otro lado, las puertas que no se desean poner en operación para evitar su apertura se energiza la electroválvula de cierre derecho, y se mantiene desenergizada la de apertura, de esta forma se logra sostener el cierre con fuerza. Para realizar la operación contraria a la apertura se realiza lo mismo anteriormente descrito, pero en sentido inverso.

En caso de que el Operador decida solo poner en servicio las puertas de operador lo puede hacer desde la cabina de conducción mediante el selector mostrado en la figura 64, lo que permitirá el accionamiento únicamente de las dos electroválvulas encargadas de las puertas del operador.



Figura 64. Selector apertura puerta de operador. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 18 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Una vez dirigido el aire neumático proveniente del regulador de presión a través de las electroválvulas el aire es transportado a un actuador neumático el cual accionará el mecanismo de puertas para controlar la apertura y cierre.

#### **4.3 ACCIONAMIENTO DEL MECANISMO.**

Los motores neumáticos utilizados en el tren ligero son cilindros de doble efecto y dos pasos, el accionamiento de estos cilindros es controlado por las electroválvulas, las cuales están encargadas de dirigir el aire para que el cilindro traslade su vástago ya sea hacia el extremo derecho o izquierdo, según sea requerido para accionar el mecanismo en la apertura o cierre de puertas.

Cuando el aire es dirigido para accionar la apertura, el aire proveniente de la electroválvula de apertura es dirigido hacia el actuador para impulsar por medio del puerto de apertura del cilindro, el vástago contenido en su interior, y antes de llegar al final de su carrera por medio de un segundo cilindro se efectúa un segundo paso el cual amortigua el desplazamiento final del émbolo provocando una apertura suave y controlada como se muestra en la figura 65.



Figura 65. Cilindro en posición de apertura. (Hernández, J. 2022).

La energía potencial almacenada en los tanques de reserva, cuando es dirigido hacia los actuadores neumáticos se transforma en energía cinética, esta energía es aprovechada para realizar el movimiento traslacional del vástago, que al salir del cilindro produce el

movimiento de la corredera grande debido a que está unida sobre ella por medio de la abrazadera del actuador, cuando el vástago origina el movimiento longitudinal de la corredera grande, provoca que el seguidor del tornillo de paso contrario unido a la misma corredera y al tornillo de paso contrario, se desplace en forma longitudinal sobre el tornillo de paso contrario, como se muestra en la figura 66.



Figura 66. Desplazamiento del seguidor de tornillo de paso contrario. (Hernández, J. 2022).

Cuando el seguidor se está desplazando, transforma el movimiento y fuerza de traslación en movimiento y fuerza de rotación, por medio de unas ranuras helicoidales en el tornillo sin fin por las cuales el seguidor realiza el desplazamiento mediante balines guías que ayudan a que el movimiento sea suave, obligando la rotación del tornillo de paso contrario y al estar constituido de dos roscas, una izquierda y otra derecha, el extremo contrario del tornillo sin fin transmitirá esta vez la fuerza y movimiento de rotación en una fuerza y movimiento de traslación en el seguidor de paso contrario del lado opuesto, logrando de esta forma el desplazamiento longitudinal de la corredera chica a la cual está unida al seguidor de paso contrario opuesto como se muestra a continuación en la figura 67.



Figura 67. Accionamiento del seguidor contrario al cilindro. (Hernández, J. 2022).

Para realizar el proceso de cierre de puertas se realiza el mismo proceso que la apertura, pero en sentido inverso, por lo cual se debe desalojar el aire contenido dentro del cilindro por la apertura por medio del mismo puerto que, ahora estará comunicado al desfogue de la electroválvula al estar desenergizada, y simultáneamente permitirá el paso del aire comprimido al puerto de cierre del cilindro por medio de la electroválvula de cierre, esto provoca el movimiento del vástago hacia su interior lo que originará el movimiento de la corredera grande hacia la parte central del mecanismo, y por medio de la transmisión de fuerza y movimiento de rotación del tornillo de paso contrario comunicará el movimiento y fuerza al seguidor del extremo opuesto, de tal forma que ambas correderas se desplacen hacia el centro simultáneamente y consiguiendo el cierre de las puertas como se muestra en la figura 68.



Figura 68. Cierre del mecanismo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 7 de junio de 2022, Huipulco CDMX).

#### **4.4. VISTA DEL USUARIO.**

Muchas veces se ignoran los cuestionamientos básicos de cómo es que funcionan los objetos que nos rodean y la ingeniería que hay detrás de cada componente, esto puede suceder debido a la cotidianidad con la que se viven las cosas.

Cuando se aborda una unidad del tren ligero no se entra pensando cómo es que se accionan las puertas o que componentes son los involucrados para que los usuarios puedan abordar o descender, lo único que se hace es entrar y descender en las diversas estaciones, pero como

se ha notado en lo descrito a través de cada capítulo, subtítulo y hojas a lo largo de esta tesis desemboca a lo que los usuarios del Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México mediante la red de pasajeros del tren ligero ven en su día a día a la hora esperar a abordar y descender de las unidades del tren ligero en cualquiera de sus estaciones, el cual es la apertura y cierre de sus puertas.

Para realizar esta función tan “sencilla” se involucran varios componentes tan complejos que por sí mismos necesitan su propio caso de estudio, los componentes involucrados son un motocompresor, unidad de mantenimiento del aire comprimido el cual consta de: un secador de aire regenerativo el cual posee la torre de filtrado y una de secado del aire, un regulador de presión y un lubricador; tuberías de distribución, electroválvulas, cilindros neumáticos, mecanismo de puertas, hojas de puertas, una unidad programable de servicios y autorización desde la cabina para poner todo en marcha y presenciar el resultado de todo lo descrito como se muestra a continuación en la figura 69.



Figura 69. Puertas abiertas y cerradas. (Hernández, J. Fotografías tomadas en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 31 de agosto y 17 de junio de 2022 respectivamente, Huipulco CDMX).

## **CAPÍTULO 5. MANTENIMIENTO.**

El presente capítulo explica de forma general los diferentes tipos de mantenimiento que existen en la industria y los tipos de mantenimiento que se realizan al material rodante dentro de sus talleres en la zona de Huipulco y Xochimilco para mantenerlo en las mejores condiciones de operación y fiabilidad, así mismo se describe de forma general el mantenimiento que se realiza a cada uno de los componentes involucrados en el funcionamiento del sistema de apertura y cierre de puertas del tren ligero como son: el motocompresor, el secador de aire regenerativo, las electroválvulas, el cilindro de puerta y el mecanismo de puertas.

### *¿Qué es el mantenimiento?*

El mantenimiento es definido como “el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible, buscando la más alta disponibilidad y con el máximo rendimiento” (Sanzol, 2010, pág. 8).

Entonces si el mantenimiento busca la preservación de la maquinaria, así como de instalaciones y equipos auxiliares, este debe ser encaminada para cumplir ciertos objetivos, es por esto por lo que (Denia, s.f) enlista los objetivos de la siguiente manera:

- “Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallas sobre los bienes precitados.
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o paro de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.

- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Balancear el costo de mantenimiento con el correspondiente al lucro cesante.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes” (p. 9).

Para cumplir de forma fortuita los objetivos, se puede dividir en tres tipos el mantenimiento: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, y mantenimiento predictivo.

### **1.- Mantenimiento correctivo.**

El mantenimiento correctivo se lleva a cabo cuando la maquinaria y/o equipo ya ha fallado, por lo regular el personal a cargo de la operación del equipo o maquinaria es el que da aviso. El principal inconveniente que tiene este tipo de mantenimiento es que se detecta la falla cuando el equipo está en servicio.

De acuerdo con Calderón, R. (2020) el mantenimiento correctivo se divide en: contingente y programado.

El mantenimiento correctivo contingente es aquel que sucede de forma imprevista, lo que significa que se debe reparar de forma rápida para evitar tiempos de paro prolongados, pérdidas económicas y daños materiales y humanos. Por otro lado, el mantenimiento preventivo programado tiene como objetivo anticiparse a los posibles fallos o desperfectos.

Denia, J (s. f) menciona las fases del proceso correctivo como se describe a continuación:

1.- Detección de la avería: Se debe analizar el mal funcionamiento de la máquina, identificando la zona responsable y síntomas para recopilar los datos que ayudaran a buscar la causa del problema y no solo enfocarse en la resolución del problema.

2.- Diagnóstico: A través de los síntomas, averiguar la localización y causa del fallo. Con base en los datos recopilados de la falla, realizar el mantenimiento pertinente.

3.- Reparación: Reponer el sistema averiado.

4.- Archivo de históricos: Consiste en llevar bitácoras de mantenimiento para la identificación de fallas históricas que ayuden a prepararse con anticipación (p. 16).

## **2.- Mantenimiento preventivo.**

El mantenimiento preventivo se realiza de acuerdo con los manuales de los fabricantes, y se refuerza con la bitácora de mantenimiento para dar seguimiento a el comportamiento de los equipos y/o sistemas con la finalidad de hacer los ajustes pertinentes al programa de mantenimiento, hacer estas actividades “tiene por objetivo EVITAR la parada inoportuna de un sistema por avería o una disminución inaceptable de sus funciones. Se logra por dos vías:

- Anticipándose a la avería.
- Eliminando la causa raíz de una avería” (Denia, s.f, pág. 24).

De acuerdo con (Universidad Nacional de Misiones, 2020; Denia, s.f) las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento es que evita las averías mayores gracias a que se ejecutan las operaciones en los momentos más oportunos, distribuye el trabajo de mantenimiento al tener cargas de trabajo más uniformes y, la principal desventaja es que aumentan las ocasiones en las que se debe intervenir al equipo.

## **3.- Mantenimiento predictivo.**

El mantenimiento predictivo consiste en predecir la falla antes de que suceda, esto se logra gracias a la experiencia propia del personal de mantenimiento y gracias a las bitácoras de

mantenimiento en donde se tienen registradas las tendencias con las que fallan los equipos o componentes.

Algunas de las ventajas que tiene el mantenimiento predictivo de acuerdo con (Universidad Nacional de Misiones, 2020) son:

- Reduce el tiempo de parada al conocerse exactamente el órgano que falla.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Define los límites de tendencia relativos a los tiempos de falla o de aparición de condiciones no estándar.

Mientras que algunas desventajas serían:

- Limitación en algunos tipos de fallos.
- El alto coste de instrumentos de medida y detección.

Teniendo en cuenta que existen diversos tipos de mantenimiento, el tren tiene un trabajo arduo que necesita de mucha planeación debido a que está dividido en dos áreas, Subgerencia de Mantenimiento Eléctrico y Electrónico, y Subgerencia de Mantenimiento Mecánico, donde ambas Subgerencias de Mantenimiento tienen en conjunto un total de 167 actividades programadas.

El personal asignado para llevar a cabo dichas funciones se encuentra distribuido de la siguiente manera: Para la Subgerencia Mantenimiento Eléctrico y Electrónico se tiene asignados 9 operarios de base (personal sindicalizado) y 6 personas de Confianza (Personal de supervisión). Por otro lado, para la Subgerencia de Mantenimiento Mecánico se tienen asignados 15 operarios de base (personal sindicalizado) y 6 personas de confianza (personal de supervisión).

Los trabajos realizados para el mantenimiento del tren ligero se llevan a cabo en el taller de mantenimiento de Huipulco y en un taller menor en la zona de Xochimilco, en donde en el taller de mantenimiento de Huipulco se trabajan las 24 horas divididas en tres turnos los 365 días del año.

## **5.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO QUE SE REALIZAN AL MATERIAL RODANTE (DELGADILLO, 2021).**

Con la finalidad de mantener los trenes en óptimas condiciones de operación, seguras y confiables se realizan rutinas de mantenimiento por períodos de tiempo o por kilometraje recorrido por los trenes en donde todas las operaciones de mantenimiento se hacen en base a los manuales de los fabricantes y por la experiencia propia del personal de mantenimiento (mejora continua).

Los diversos tipos de mantenimiento que se realizan son los siguientes:

### **1.- Mantenimiento Preventivo Menor:**

#### ***Mantenimiento preventivo programado tipo “A” o revisión diaria.***

Este tipo de mantenimiento consiste en una revisión diaria al finalizar el día a los 23 trenes para conocer su rendimiento el cual es efectuado en el taller de Huipulco, taller Xochimilco y terminal Taxqueña.

Esta revisión diaria se le conoce también como pruebas de entrada y salida, se llevaba a cabo con un formato de Check List, en donde se reporta y analizan las condiciones en las que los 23 trenes entrar al taller para conocer el estado de funcionamiento de los equipos auxiliares como lo son botoneras, alumbrado, carteros, marcos de ventiladores, anuncio a

pasajeros e interfono, etc. y se vuelven a realizar antes de salir del taller para dejar a los trenes en las más óptimas condiciones de operación.

***Mantenimiento preventivo programado tipo “B” o mantenimiento sistemático mensual.***

Este mantenimiento se realiza cada mes de acuerdo con el calendario de ingresos programados de trenes el cual generalmente consiste en limpieza, revisión, lubricación y ajuste de los equipos a intervenir.

Por ejemplo, algunas actividades designadas al mantenimiento mecánico serían: Sopleteado bajo bastidores, Mantenimiento ligero a bogie motriz y bogie remolque, mantenimiento a motocompresor y mantenimiento a pantógrafo. Mientras que algunas actividades designadas al mantenimiento eléctrico electrónico son: Pruebas de entrada, Aislar alta tensión y desconectar batería, mantenimiento a articulación y mantenimiento a cabina entre otras actividades.

***Mantenimiento preventivo programado tipo “C” o cíclico.***

Este mantenimiento es programado de acuerdo con períodos de tiempo y para el caso del mantenimiento mecánico van a partir de períodos de 3 a los 30 meses (2.5 años) y, para el mantenimiento eléctrico y electrónico abarca los períodos de 4 a 12 meses para los equipos que así lo requieran.

Generalmente este tipo de mantenimiento consiste en la limpieza, revisión, lubricación, sustitución de piezas dañadas y ajuste de los equipos a intervenir.

Algunas de las actividades correspondientes al mantenimiento mecánico tipo “c” serían: Aceitado de cilindro de puertas (Frecuencia de 3 meses), Revisión de secador de aire

(Frecuencia de 6 meses), Mantenimiento a electroválvula serie k y Directair 6 (Frecuencia de 12 meses), revisión de cilindro de puertas (Frecuencia de 24 meses).

Algunas de las actividades correspondientes al mantenimiento eléctrico-electrónico tipo “c” serian: Revisión y sopleado de motor de tracción (Frecuencia de 6 meses), Limpieza de luminarias (Frecuencia de 6 meses), Revisión de sistemas de audio (Frecuencia de 12 meses).

## **2.- Mantenimiento preventivo mayor:**

Este tipo de mantenimiento se realiza de acuerdo con períodos de tiempo el cual abarca 7.5 años o 750 000 km, este mantenimiento consiste en una revisión general de cada uno de los componentes que conforman el tren articulado con la finalidad de hacer la sustitución de toda aquella pieza que haya concluido su vida útil o de servicio de acuerdo con los manuales que proporcionan los fabricantes y a la experiencia del trabajo.

## **3.- Mantenimiento correctivo.**

Este mantenimiento se realiza cuando se reporta una falla y consiste en una revisión para detectar la causa de la falla y llevar a cabo la atención de reparación para la puesta en servicio en condiciones seguras.

Como se explicó anteriormente, existen diversos tipos de mantenimiento programados para cada uno de los componentes en el tren ligero el cual se encuentra dividido en dos subgerencias: mecánico y eléctrico-electrónico. Ahora que se conoce cuáles son y en qué consisten los tipos de mantenimiento, se abordará el mantenimiento mecánico en los elementos que se involucran en el sistema de apertura y cierre de puertas como lo es el motocompresor, el secador de aire regenerativo, las electroválvulas, el cilindro de puertas, el mecanismo de puertas y las hojas de puertas.

### 5.1.1. MANTENIMIENTO A MOTOCOMPRESOR.

El mantenimiento correspondiente para el compresor es del tipo “B” mantenimiento ligero, Tipo “C” mantenimiento menor y mantenimiento mayor.

Dentro de la programación de mantenimiento al compresor se le debe inspeccionar los niveles de aceite ya que es fundamental para su funcionamiento, porque el aceite es el encargado de la lubricación y así mismo hermetiza la rendija de los rotores y evacua el calor, por lo que se debe verificar que el depósito esté lleno.

Lo que respecta al compresor se hace el desensamble general de cada una de sus piezas, y se realiza una limpieza general de cada uno de los componentes que lo conforman, con la finalidad de inspeccionarlos en busca de fisuras o daños, y verificar el estado en el que se encuentran para determinar si están en condiciones óptimas de operación y de no ser así hacer su reemplazo, y de esta forma reducir al mínimo el mantenimiento correctivo.

Cuando se termina el mantenimiento al motocompresor es necesario realizar pruebas de funcionamiento, estas pruebas se hacen con la ayuda de un banco de pruebas (Ver figura 70) que simula la operación del motocompresor en condiciones normales de operación.

La finalidad de realizar las pruebas consiste en verificar el sentido de rotación del motor, la hermeticidad y que el compresor cumpla con sus parámetros de operación. Para corroborar el sentido correcto de rotación del motor del compresor, se debe visualizar en el banco de pruebas que el manómetro M1 suba tan pronto se ponga en marcha el motor, si la presión interna del compresor aumenta rápidamente (se verá reflejado en el manómetro M1) significa que el sentido de giro es correcto, de lo contrario se debe detener el equipo e invertir las

conexiones, de lo contrario el compresor no generará la compresión del aire y desencadenaría en el forzamiento de los tornillos de compresión.

La hermeticidad del compresor se puede corroborar una vez se alcancen sus parámetros de operación los cuales son de 1.8 bar a 6 bar en el cuerpo de compresión, y alcanzado los 6 bar la válvula de retención mínima permite el paso para la alimentación de la red neumática que opera de 8 a 10 bar controlado por un presostato (este aumento de presión se ve reflejado en el manómetro M2 del banco de pruebas), con estos parámetros se deja el motocompresor en operación por aproximadamente 10 minutos, posterior a ese tiempo se comprueba si no hay un descenso en la presión y, de no ser así se garantiza que el equipo esta hermetizado correctamente.



Figura 70. Banco de pruebas de motocompresor. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 23 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

### 5.1.2. SECADOR DE AIRE REGENERATIVO.

El mantenimiento que le corresponde al secador de aire regenerativo es un mantenimiento cíclico y un mantenimiento mayor. También se incluyen trabajos de mantenimiento correctivo.

#### ***5.1.2.1. Mantenimiento preventivo.***

En el mantenimiento preventivo se debe verificar que la secuencia de operación sea la adecuada, comprobar que su electroválvula de escape desaloje el agua retenida en la torre de filtrado en cada paro del compresor, revisar el interior de las válvulas de retención, cerciorarse que el equipo no presente fugas y daño mecánico.

Estas acciones se toman para prevenir fugas y daño en las válvulas de retención; mal funcionamiento, fugas, ruidos y deficiencia en el desalojo de agua en las electroválvulas; aumento de humedad en la salida o mucha agua en el filtro, así como suciedad o partículas muy grandes que no sean alúmina.

El mantenimiento general al secador de aire se divide en tres pasos, en el primer paso se verifican las condiciones de operación del secador regenerativo, la secuencia de operación, detección de las fallas más comunes y revisar todos los componentes para cerciorarse que no existan fugas, daño mecánico en elementos principales y uniones mecánicas con el bastidor del tren por vibración.

En el segundo paso se desmonta el secador del tren para hacer el desensamble y la limpieza general de las torres tanto de secado, como de filtrado e identificar piezas que se encuentren dañadas y localizar a qué kit de refacciones pertenecen como se muestra a continuación en la figura 71 y 72.



Figura 71. Elementos de torre de filtrado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

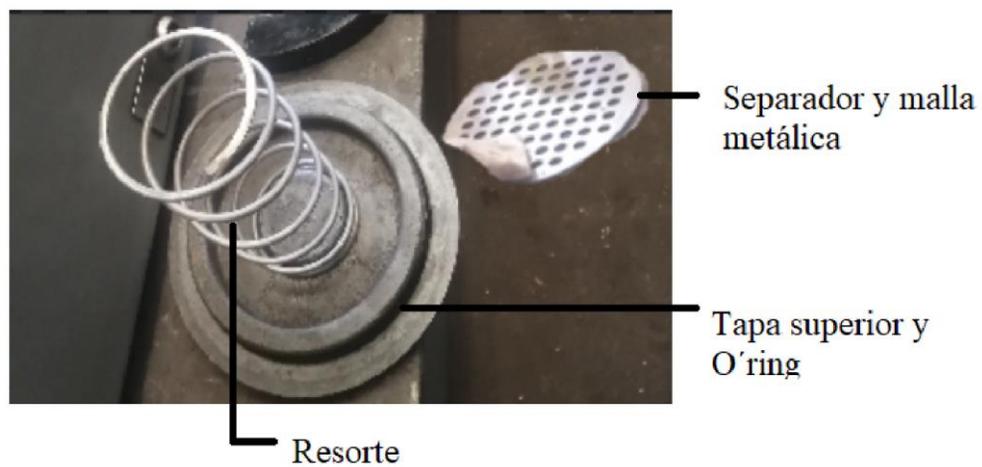


Figura 72. Elementos torre de secado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

En el tercer paso se debe reemplazar la alúmina, los kits o piezas individuales requeridas y ensamblarlo de acuerdo con especificaciones del fabricante, se debe revisar el bastidor en busca de fisuras o daños para el montaje del secador, como se muestra a continuación en la figura 73.



Figura 73. Mantenimiento a secador de aire regenerativo. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 25 de agosto de 2022, Huipulco CDMX).

Las recomendaciones para su instalación son que no se debe probar hidrostáticamente porque dañaría el material desecante, aplicar teflón líquido en las cuerdas a ensamblar, no sobrepasar los torques proporcionados por el fabricante en las conexiones, comprobar la ausencia de fugas, energizar el sistema, presurizar el sistema en busca de fugas y corregirlas, comprobar el funcionamiento de la válvula de escape en el paro del compresor, comprobar las condiciones de operación mencionadas en el capítulo 2, página 47, utilizar tuberías de cobre y tener un espacio suficiente entre el refrigerante del compresor y el tanque de almacenamiento principal, que están unidos por medio de tubería para garantizar el descenso de temperatura del aire comprimido y evitar la degradación de las esferas de alúmina.

### ***5.1.2.2. Mantenimiento correctivo.***

El mantenimiento correctivo es un proceso que se lleva a cabo en tres niveles. El mantenimiento correctivo de primer nivel se hace para corregir pérdidas de presión o flujo de aire. En el segundo nivel se corrigen fugas de aire o caídas de presión con presencia de suciedad o presencia de agua en las tuberías. Por último, en el tercer nivel se corrigen daños a la estructura, tanque de regeneración y torre de filtrado o secado.

Mantener el secador de aire en las mejores condiciones de operación es fundamental ya que es el encargado de mantener limpio y seco el aire que será distribuido a los diversos componentes a través de la instalación neumática, y de presentar humedad afectaría en la vida útil y deterioro de todos los componentes, ya que el agua es el principal contaminante en instalaciones neumáticas porque se encuentra presente en el aire que es arrastrado por el compresor. Si la calidad del aire no es buena puede acarrear consigo muchos problemas como lo pueden ser: humedad que provoca corrosión, fugas de aire y debido a las fugas menor fuerza de empuje en los actuadores neumáticos, reducir la vida útil de los elementos y equipos neumáticos y caídas de presión.

### **5.1.3. MANTENIMIENTO A ELECTROVÁLVULAS.**

Para evitar daños físicos y daños en propiedad para el mantenimiento de la electroválvula se recomienda desconectar el suministro eléctrico, desfogar las líneas de aire y desconectar el suministro de aire, operar bajo las presiones y temperaturas especificadas por el fabricante y en un medio libre de humedad.

El mantenimiento para las electroválvulas corresponde al mantenimiento cíclico y mantenimiento mayor en donde se deben hacer la comprobación de fugas ya que al estar sometidas a mucha presión los O 'ring tienden a dañarse, por lo cual se deben inspeccionar

en busca de dañados para su sustitución, posteriormente se debe limpiar todo el cuerpo de la electroválvula para quitar las partículas de suciedad y grasa, se debe hacer el desensamble de sus componentes como se muestra en la figura 74, y con ayuda de disolventes limpiar cada pieza hasta dejarla totalmente libre de impurezas, para posteriormente engrasar y hacer el ensamble de la electroválvula.

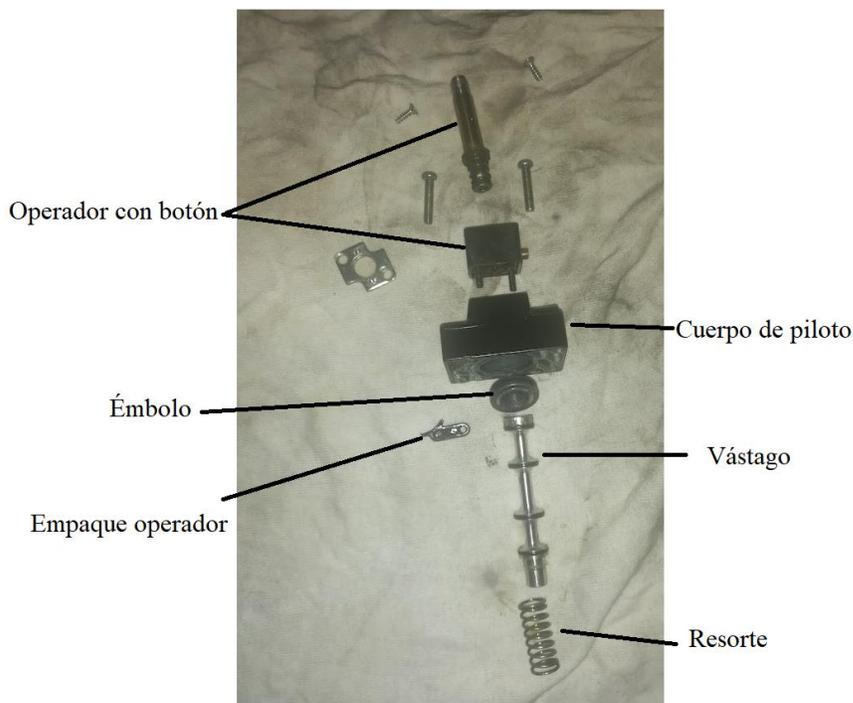


Figura 74. Mantenimiento a electroválvula B6. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de julio de 2022, Huipulco CDMX).

Una vez finalizada la tarea de mantenimiento se debe comprobar el funcionamiento de apertura y cierre, hacer pruebas de hermeticidad y estanqueidad en caso de presentarse un problema se debe sustituir el kit que presente fallas.

#### 5.1.4. MANTENIMIENTO A CILINDRO.

Es indispensable que el aire suministrado al cilindro neumático esté libre de impurezas y agua para garantizar el buen funcionamiento y esto se logra siempre y cuando el compresor, el filtro y la tubería del tren trabajan normalmente.

El mantenimiento correspondiente al cilindro de puertas es el cíclico el cual consiste en el aceitado del mismo, así como comprobar que tenga estanqueidad, comprobar fugas en las roscas tanto en la parte delantera como trasera, en el orificio de alimentación, a la salida del eje del pistón y en los tapones de la válvula, se debe quitar el sello limpiador y O-ring verificando el estado del buje y verificar si presenta daños para su posterior sustitución, lavar tanto la cabeza delantera como trasera y secarlo bien para posteriormente soplear los orificios calibrados que posee, secar el ensamble del vástago - émbolo - camisa de amortiguamiento, soplear y limpiar perfectamente con gasolina blanca, y por último cambiar el kit de sellos de émbolo.

#### 5.1.5. MANTENIMIENTO A MECANISMO DE PUERTAS.

Se debe tener cuidado de no poner el mecanismo en sitios donde exista riesgo de acumular rebaba, desperdicios y polvo a la hora de su almacenaje e instalación de lo contrario se podría dañar el mecanismo, provocando atoramientos y desgastes permanentes.

##### ***Mantenimiento preventivo.***

En este tipo de mantenimiento se debe realizar una inspección sobre el mecanismo para detectar falta de tornillos o que en su defecto se encuentren flojos.

Dentro de este tipo de mantenimiento se debe verificar el ajuste longitudinal del tornillo de paso contrario el cual debe de ser de 0.4 mm y de no ser así, se debe proceder a su ajuste.

### ***Mantenimiento sistemático.***

Se debe hacer una revisión general del mecanismo en busca de anomalías y de presentarlas corregir y si se encuentran piezas desgastadas proceder a su cambio.

Este mantenimiento debe ser realizado antes de la puesta en servicio y después de cualquier operación de mantenimiento correctivo o preventivo, el cual consiste en verificar el funcionamiento del mecanismo de accionamiento de puertas de acceso efectuando un control dimensional, verificando el buen funcionamiento de rotación de excéntricas, traslación de los soportes de suspensión y motor neumático.

### ***Mantenimiento general.***

Para el mantenimiento del mecanismo de puertas es necesario desmontarlo, una vez desmontado es llevado a una mesa de trabajo en donde con la ayuda de trapos se limpia toda grasa y suciedad acumulada, cuando se desprende de la suciedad se procede a desarmarlo por completo, cuando se encuentra desensamblado el mecanismo, se vuelve a limpiar por completo, pero esta vez con la ayuda de un disolvente como lo es gasolina para eliminar todo rastro del lubricante utilizado anteriormente, esta limpieza se realiza de igual forma en los balines que posee el mecanismo.

Una vez que el mecanismo se encuentra limpio, algunas de sus piezas como lo son el seguidor de tornillo de paso contrario, las “T”, el soporte del cilindro como se observa en la figura 75, se llevaban a la carda para darles acabado, matizarlos y la principal función de hacerlo aparte de darles una apariencia estética es localizar fisuras y poder hacer las intervenciones pertinentes.



Figura 75. Proceso de cardado. (Hernández, J. Fotografía tomada en el taller de mantenimiento del tren ligero, el día 22 de abril de 2022, Huipulco CDMX).

Una vez terminado el proceso de limpieza el mecanismo se engrasa para lubricar de acuerdo con los manuales de mantenimiento, este proceso de engrasado de igual forma se hace para las partes que llevan balines como lo son los seguidores de tornillo de paso contrario y las guías, cuando se finaliza de engrasar el mecanismo a la hora de ensamblarlo de nuevo toda la tornillería se ajusta con Loctite para garantizar un ajuste óptimo y se hace el ajuste del juego axial del tornillo de paso contrario, una vez hechos todos los ajustes y hacer una comprobación manual al mecanismo para comprobar su apertura y cierre correctamente, se vuelve a montar en el vagón, donde se nivela y ajusta el nivel de las puertas mediante las excéntricas.

## **CONCLUSIÓN.**

Luego de haber analizado el sistema de las puertas del Tren Ligero se entendió la importancia que tienen los componentes, sus parámetros de operación y la razón de brindarles mantenimiento. Lo más importante es entender el funcionamiento neumático en particular del motocompresor ya que es el principal generador de energía y encargado de suministrar una presión regulada por medio de un presostato de 8 a 10 bar no solo para el sistema analizado, sino también para otros sistemas como lo es la suspensión secundaria, el sistema de freno y para el accionamiento del pantógrafo.

Los componentes por si solos no pueden cumplir la función final del sistema de puertas, es por ello por lo que al ser integrados en un conjunto se complementan por ejemplo, el motocompresor es el encargado de la generación del aire comprimido, pero el secador de aire regenerativo se encarga de limpiar, filtrar y mantener en 4% la humedad relativa del aire generado para evitar corrosión y pérdidas de potencia debido a la presencia de agua en el sistema, lo que permite al aire neumático estar en óptimas condiciones de trabajo para ser distribuido.

Al haber profundizado en el análisis del sistema queda expuesta la necesidad de brindar operaciones de mantenimiento y limpieza de los componentes, ya que cualquier tipo de obstrucción y suciedad provoca desgaste y atascamiento en los mecanismos tanto neumáticos como mecánicos, además de fugas provocadas por daños en empaques, sellos y O´rings las cuales si no se llegan a atender de forma adecuada puede dañar y provocar el mal funcionamiento del propio tren.

## REFERENCIAS.

- Arcadio, S. (s.f). *Inspección de calidad de trenes en mantenimiento mayor*. D.F.
- Atlas Copco. (2014). Recuperado el 19 de septiembre de 2022, de Manual de aire comprimido: <https://acortar.link/1TFHWF>
- Atlas Copco. (s.f). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Secado del aire comprimido mediante el secado por absorción y desecante: <https://acortar.link/PqWqsZ>
- Buenache, A. (2010). Teoría diseño y simulación de componntes para docencia interactiva vía web. [*Proyecto de grado*]. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Burkert Fluid Control System. (2021). Recuperado el 1 de julio de 2022, de ¿Qué es una electroválvula y cómo funciona?: [https://n9.cl/burkert\\_electrovalvework](https://n9.cl/burkert_electrovalvework)
- C & R Sistemas y Equipos, S. A. de C. V. (2017). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Secadores: <https://www.cyrsistemas.com/secadores.html>
- Calderón, R. (2020). Recuperado el 19 de abril de 2023, de Tipos de Mantenimiento: <https://drive.google.com/file/d/1aIt2y5pcsiNHpZaGjAxCSgN6GVTHOE9B/view>
- CEJN The Quick Connect Solution Provider. (s.f). *mundo compresores*. Recuperado el 22 de julio de 2022, de Los diferentes tipos de compresores: <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores>
- Clippard Instrument Laboratory. (206). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Cilindros amortiguados: <https://bit.ly/3AhuPsV>

Como lo hago aprende fácil Mecánica Electricidad. (2021). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Cómo funciona el secador de aire comprimido recomendaciones de mantenimiento: <https://www.youtube.com/watch?v=PDAiXZnTK3U>

Creus, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. España: Marcombo.

Delgadillo, R. (2021). *Folleto técnico del tren ligero modelos: TE-90, TE-95, TE-06 y TE-12*. CDMX.

Delgadillo, R. (s.f). *Sistema neumático del material rodante del tren ligero*. D.F.

Denia, J. (s.f). Recuperado el 19 de abril de 2023, de Procesos y gestión del mantenimiento y calidad: <https://n9.cl/kxyya>

Ecuatoriana Industrial. (2022). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Secador de aire comprimido y su importancia: <https://n9.cl/x4ucy>

EVANS. (2017). Recuperado el 2022 de agosto de 24, de Unidad de mantenimiento 3/4": <https://acortar.link/QjG9iz>.

Fernández, P. (s.f). *Compresores*. Universidad de cantrabia. Recuperado el 1 de julio de 2022, de Compresores: [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf)

FESTO. (2022). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Filtros y separadores: <https://n9.cl/xzzew>

Festo Didáctico. (1978). *Curso de neumática para la formación profesional*. Alemania Federal: BBF.

Hanlon, P. (2001). *Compressor handbook*. New York: McGraw-Hill.

- Indutorres Tecnología Alternativa. (2022). Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de El arte de dimensionar un secador de aire comprimido: <https://acortar.link/wTCMCA>
- Intor Manufacturing Solutions. (2013). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Clasificación de válvulas neumáticas direccionales: <https://bit.ly/3yAiLl0>
- Iván. (2008). *compresores*.
- Junta de Castilla y León. (2012). Recuperado el 19 de septiembre de 2022, de Manual técnico Aire comprimido: <https://acortar.link/wYWN2k>
- Kaeser. (2010). Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de Técnica de aire comprimido: <https://ar.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:42-5981>
- LEGO education. (2022). Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de ¿Qué es la neumática?: <https://acortar.link/asxPJT>
- Mavainsa. (2014). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Compresores: [https://www.mavainsa.com/pdfs/7\\_compresores.pdf](https://www.mavainsa.com/pdfs/7_compresores.pdf)
- MiCRO. (2015). Recuperado el 14 de septiembre de 2022, de Cilindros: <https://acortar.link/cnyoVe>
- Mo's corner: mo explains. (2020). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Proceso de regeneración de los secadores de aire seco: <https://acortar.link/bh81yr>
- NEUMATIC Compresores y Equipos Industriales. (s.f). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Secadores regenerativos: de <https://n9.cl/2dm55f>
- Nicolás, A. (2009). *Neumática práctica*. Madrid: Paraninfo.

- Parker. (2012). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Secador de adsorción:  
<https://acortar.link/2HrDnN>
- Parker. (2019). Recuperado el 1 de julio de 2022, de 10 contaminantes que afectan su sistema de aire comprimido: <https://n9.cl/yibml>
- Quadri, N. (2001). *Sistemas de aire acondicionado*. Buenos aires: Alsina.
- Ramírez, S. A. (2006). *Inspección de calidad de trenes en mantenimiento mayor*. DF.
- Reynaga, D. (2021). Recuperado el 22 de septiembre de 2022, de Cálculo de compresor - Tanque de almacenamiento - Aire comprimido:  
<https://www.youtube.com/watch?v=pewdZxWEjk0>
- Rodavigo. (2016). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Válvulas y electroválvulas:  
<https://acortar.link/am4OHH>
- Rodríguez, I. (2018). Diseño de alimentación de aire a compresor de turbina de gas prototipo. *[Proyecto de investigación]*. Universidad Veracruzana, Veracruz. Obtenido de <https://n9.cl/k9jvf>
- Sainz, A. (2008). Adsorción y separación de n-alcános en hexacianocobaltatos de metales de transición. *[Tesis de maestría]*. Instituto Politécnico Nacional.
- Salazar, R. (2001). Compresores centrífugos. *[tesis]*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León.
- Sánchez, A. (2020). Recuperado el 20 de septiembre de 2022, de Eficiencia de los compresores: <https://n9.cl/0kghr>

- Sanzol, L. (2010). Implantación de plan de mantenimiento tpm en planta de cogeneración. *[Tesis]*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones.
- SERVIAIRE. (2019). Recuperado el 28 de septiembre de 2022, de ¿Qué es o que significa NL/MIN?: <https://www.serviaire.com/que-es-nl-min/>
- Servicio de Transportes Electricos. (13 de Enero de 2023). *Servicio de Transportes Electricos*. Obtenido de Servicio de Transpostes Electricos: <https://www.ste.cdmx.gob.mx/>
- Servicio de Transportes Eléctricos. (s.f). Recuperado el 10 de septiembre de 2022, de Manual administrativo: <https://acortar.link/sZyKQy>
- Shi. (2018). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Servicios hidráulicos industriales: <https://valvulas-hidraulicas.mx/las-electrovalvulas/>
- Sierra, L & García, I. (2015). Diseño de un banco de pruebas a presión hidrostática. *[Proyecto de grado]*. Universidad Santo Tomás.
- U. de Santiago de Chile. (2020). Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de Principio y leyes de la neumática: <https://acortar.link/SB8g5V>
- UNAM Facultad de Ingeniería. (s.f). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Análisis energético en un compresor: <https://n9.cl/kiwj0>
- Universidad del País Vasco. (2013). Recuperado el 1 de julio de 2022, de Actuadores de los sistemas neumáticos: [https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/361\\_ca.pdf](https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/361_ca.pdf)

Universidad Nacional de Misiones. (2020). Recuperado el 19 de abril de 2023, de Tipos de mantenimiento: <https://n9.cl/yjs85>