



Diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un respirador mecánico de bajo costo y accesorios complementarios de respiradores comerciales para entrenamiento y simulación.

Luje Padilla, Cristhian Israel y Rodríguez Solano, Jorge Javier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Castellanos Villa, Santiago David, PhD

16 de agosto del 2021



Document Information

Analyzed document	Tesis_Luje_Rodriguez.docx (D111518108)
Submitted	8/20/2021 7:03:00 PM
Submitted by	Cortez Pazmiño Byron Hernan
Submitter email	bhcortez@espe.edu.ec
Similarity	10%
Analysis address	bhcortez.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Jesus Pallo Perfil Tesis.pdf Document Jesus Pallo Perfil Tesis.pdf (D30050126)		1
W	URL: http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/137798.pdf Fetched: 6/22/2021 3:00:48 AM		1
SA	Hilia Cerón-Guido García.pdf Document Hilia Cerón-Guido García.pdf (D108969750)		1
W	URL: https://pdfkul.com/disenio-en-ingenieria-mecanica-de-shigley-8th-hdpdf_59c180251723ddda42c18295.html Fetched: 5/27/2021 2:03:09 AM		2
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS CAPITULOS.docx Document TESIS CAPITULOS.docx (D35877653) Submitted by: pgriofrio@espe.edu.ec Receiver: pgriofrio.espe@analysis.arkund.com		2
W	URL: https://idoc.pub/documents/diseo-de-maquinas-4edi-norton-en5kz1q1veno Fetched: 12/9/2020 7:01:23 AM		1
W	URL: https://docplayer.es/164362362-Disenio-montaje-y-puesta-a-punto-del-sistema-de-transmision-de-potencia-del-banco-de-pruebas-de-motores-de-la-fundacion-universitaria-los-libertadores.html Fetched: 11/5/2020 11:21:55 PM		1
SA	CHAPOÑAN-PERALTA 2018-I.docx Document CHAPOÑAN-PERALTA 2018-I.docx (D40594925)		1
W	URL: https://docplayer.es/88495530-Escuela-superior-politecnica-del-litoral-facultad-de-ingenieria-en-mecanica-y-ciencias-de-la-produccion-examen-complexivo-ingenieros-mecanicos.html Fetched: 12/4/2019 8:33:42 AM		1
W	URL: https://docplayer.es/76376893-Escuela-politecnica-del-ejercito-departamento-de-ciencias-de-la-energia-y-mecanica-carrera-de-ingenieria-mecanica.html Fetched: 6/16/2021 3:33:36 PM		1





DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un respirador mecánico de bajo costo y accesorios complementarios de respiradores comerciales para entrenamiento y simulación**” fue realizado por los señores **Luje Padilla, Crithian Israel y Rodríguez Solano, Jorge Javier**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de agosto de 2021.

Firma:
Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO DAVID
CASTELLANOS
VILLA

Castellanos Villa Santiago David PhD

C.C. 1716962608



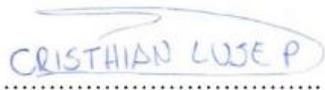
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Luje Padilla, Cristhian Israel y Rodríguez Solano, Jorge Javier**, con cédulas de ciudadanía n° 1726635970 y 1717825903, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un respirador mecánico de bajo costo y accesorios complementarios de respiradores comerciales para entrenamiento y simulación** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de agosto de 2021

Firma


.....

Luje Padilla, Cristhian Israel

C.C.: 1726635970

Firma


.....

Rodríguez Solano, Jorge Javier

C.C.: 1717825903



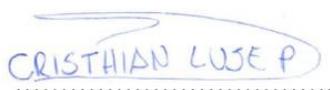
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Luje Padilla, Cristhian Israel y Rodríguez Solano, Jorge Javier**, con cédulas de ciudadanía n° 1726635970 y 1717825903., autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un respirador mecánico de bajo costo y accesorios complementarios de respiradores comerciales para entrenamiento y simulación** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Firma


.....

Luje Padilla, Cristhian Israel

C.C.: 1726635970

Sangolquí, 18 de agosto de 2021

Firma


.....

Rodríguez Solano, Jorge Javier

C.C.: 1717825903

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi madre, padre y hermanos, quienes con paciencia siempre supieron brindarme todo su apoyo, fuerzas para seguir adelante y el ejemplo de vida. A mis amigos, mi segunda familia, por haber estado en cada etapa de mi formación profesional soportándome y animándome a todo momento. A mi entrenadora por enseñarme día a día sobre la dedicación. Y a mi ángel Fanny Espinosa, a quien desde donde me observa espero que se sienta orgullosa.

Cristhian I. Luje P.

Dedico el presente trabajo a toda mi familia que siempre estuvo apoyándome de distintas maneras durante mi vida y mi formación profesional, en especial a mi tía Irma que siempre quiso verme graduado de la Universidad, y aunque ya no nos acompaña en vida, siempre estará presente en nuestras memorias.

Jorge J. Rodríguez S.

AGRADECIMIENTO

A mi madre Sylvana Padilla por ser mi pilar y mi apoyo incondicional, por brindarme sus ánimos en cada paso sin cansarse ni flaquear, por sus consejos y regaños, por ser un ejemplo de persona, por instarme a estudiar y terminar mi carrera universitaria.

A mi padre César Lujé por ser un ejemplo de trabajo y esfuerzo, por toda la paciencia con mi persona y por ese apoyo en cada uno de los aspectos de mi carrera universitaria, por enseñarme que con dedicación y disciplina se puede realizar cualquier trabajo.

A mis hermanos Jefferson, Mayerli, Daniela porque me dan un motivo para esforzarme y crecer, porque por ellos quiero madurar y ser mejor persona y profesional.

A mis amigos, mi familia Andrés, Galo, Bryan quienes me acompañaron, aguantaron, apoyaron y ayudaron a lo largo de mi vida universitaria, y quienes con orgullo quisiera llamar colegas.

A Kevin y mis demás compañeros que desde siempre han sido parte de mi vida y han velado por mí. A mi entrenadora Jessica Valencia quien me enseñó a amar la vida, porque diario me da el ejemplo de la dedicación, compromiso y esfuerzo. A Margarita, porque con su sonrisa creyó en mí y me anima a no rendirme.

A Jorge mi compañero en este gran proyecto, quien, con su conocimiento, empeño y profesionalismo, aportó significativamente al desarrollo y conclusión, brindando sus mejores ideas, trabajando e incentivando a continuar en este camino.

A todos los docentes y personal de la Universidad de las Fuerzas Armadas quienes formaron parte de mi carrera universitaria. En especial a nuestros tutores Henry López, Santiago Castellanos y Nicolás Páez, quienes supieron guiarnos durante el transcurso de este proyecto, y que con su tiempo y dedicación nos brindaron sus conocimientos para poder culminar con este trabajo.

Cristhian I. Lujé P.

A mi madre por estar siempre pendiente y apoyándome durante toda mi vida, brindándome una motivación constante para así lograr culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mis abuelos José y Rosa por apoyarme desde siempre, brindándome sus consejos y confianza, siendo las bases para mi desarrollo personal y académico.

A mi compañero de tesis Cristhian por su gran empeño en el desarrollo del proyecto, siempre buscando aportar con ideas que nos permitieron lograr un buen trabajo final.

A nuestros tutores Santiago Castellanos, Henry López, Nicolás Páez por guiarnos en cualquier inquietud y dificultad presentada en el desarrollo el proyecto.

A los profesionales de la Universidad que nos apoyaron directamente con sus consejos durante la ejecución del proyecto.

A mis amigos y compañeros de la carrera por haber compartido conmigo todo este tiempo de estudios, brindándome su apoyo tanto en el ámbito académico como personal.

Jorge J. Rodríguez S.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
INDICE DE FIGURAS.....	15
RESUMEN.....	20
ABSTRACT.....	21
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	22
Antecedentes.....	22
Definición del problema.....	24
Objetivos.....	26
Objetivo general:.....	26
Objetivos específicos.....	26
Justificación e importancia.....	27
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	29
Respiradores.....	29
Funcionamiento de respiradores.....	30
Tipos.....	33
Componentes.....	33
Sistema de transmisión.....	34

	10
Engranajes	36
Tornillo sin fin corona.....	37
Lubricación de un tornillo sin fin corona.....	39
Chavetas	41
Rodamientos.....	42
Fallas por fatiga de cargas variables.....	45
Límite de resistencia a la fatiga.....	45
Factores que modifican el límite de resistencia	45
Criterios de falla por fatiga	47
Manufactura	48
Manufactura por arranque de viruta.	48
Impresión 3d	50
Corte Láser.....	51
Respirador Hamilton Galileo.....	52
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA, ELEMENTOS PARA UN RESPIRADOR EMERGENTE Y VÁLVULAS PARA RESPIRADOR GALILEO	57
Respiradores Emergentes	57
Brazos de Aplastamiento	58
Sistema de transmisión	61
Cálculo para el diseño del sistema de transmisión sin fin corona.	66

	11
Geometría de los engranes.....	67
Geometría del engrane (Corona)	71
Cálculo de diámetro de la flecha para los brazos de aplastamiento	73
Eficiencia del tornillo sin fin.....	73
Fuerzas en la corona	75
Fuerzas en el tornillo sin fin	79
Diseño de flecha.....	80
Resistencia a la fatiga del material	85
Criterio de falla de Goodman Modificado.....	89
Cálculo de materiales tornillo sin fin – corona.....	90
Diseño de chavetas.....	92
Selección de rodamientos.....	95
Estructura del respirador mecánico	96
Válvulas de respirador Galileo.....	105
Geometría	106
Modelado 3D.....	109
Visualización de Funcionamiento en modelado 3D.....	114
CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN DE RESPIRADOR MECÁNICO EMERGENTE Y MANUFACTURA DE VÁLVULAS PARA RESPIRADOR GALILEO	117
Prototipo preliminar de respirador mecánico.....	117

	12
Estructura	117
Sistema de transmisión sin fin corona.....	118
Acople motor- tornillo sin fin.....	122
Brazos de aplastamiento.....	122
Soportes para bolsa de respiración AMBU.....	123
Esquema de modelo diseñado en 3D.	124
Prototipo final y correcciones de respirador mecánico	124
Estructura	124
Sistema de transmisión	126
Flechas de transmisión.....	127
Acople motor- tornillo sin fin.....	129
Brazos de aplastamiento.....	130
Soportes para bolsa de respiración AMBU.....	130
Accesorios.....	131
Válvulas de respirador Galileo.....	135
 CAPÍTULO V: ENSAYOS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL.....	 140
Respirador mecánico.....	140
Válvulas de respirador Galileo.....	150
 CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE COSTOS Y FACTIBILIDAD	 153

	13
Costos directos.....	153
Costos indirectos.....	158
Análisis de Factibilidad.....	160
CAPÍTULO VII	161
CONCLUSIONES	161
RECOMENDACIONES	163
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
ANEXOS.....	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Selección tipo de engranes</i>	64
Tabla 2 <i>Cargas en apoyos</i>	96
Tabla 3 <i>Complementos impresión 3D</i>	131
Tabla 4 <i>Elementos realizados por corte laser</i>	132
Tabla 5 <i>Elementos de sujeción</i>	133
Tabla 6 Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas	153
Tabla 7 Remuneración a estudiantes.	153
Tabla 8 Materiales y costo de fabricación incluido prototipos.	154
Tabla 9 Materiales y costo de fabricación equipo final.....	156
Tabla 10 Materiales y costo de fabricación válvulas.	157
Tabla 11 Costos indirectos.....	158
Tabla 12 Detalle de costos y financiamiento.	158

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Respirador MIT / Diseño propuesto</i>	25
Figura 2 <i>Paciente con respiración asistida</i>	29
Figura 3 <i>Funcionamiento básico de un respirador artificial</i>	31
Figura 4 <i>Funcionamiento básico de un respirador artificial</i>	32
Figura 5 <i>Paciente conectado a un respirador mecánico UCI</i>	33
Figura 6 <i>Engranajes de ejes perpendiculares</i>	37
Figura 7 <i>Tornillo sin fin corona</i>	37
Figura 8 <i>Esquema fuerzas resultantes en un tornillo sin fin corona</i>	38
Figura 9 <i>Representación de chaveta y chavetero</i>	41
Figura 10 <i>Partes de un rodamiento</i>	42
Figura 11 <i>Esquema de cargas</i>	44
Figura 12 <i>Límite de resistencia a la fatiga</i>	45
Figura 13 <i>Factor de tamaño</i>	46
Figura 14 <i>Factor de carga</i>	46
Figura 15 <i>Diagrama de fatiga de varios criterios de falla</i>	47
Figura 16 <i>Esquema de funcionamiento respirador Hamilton Galileo</i>	53
Figura 17 <i>Despiece y secuencia de flujo principal del ventilador Hamilton Galileo</i> ..	54
Figura 18 <i>Bloque de Válvula de seguridad</i>	55
Figura 19 <i>Válvula de sobre-presión</i>	56
Figura 20 <i>Respirador Galileo y Ubicación de Válvulas</i>	56
Figura 21 <i>Esquema brazos de aplastamiento</i>	59
Figura 22 <i>Gráfica ciclos vs Esfuerzo flector Acero Inox 304</i>	60

Figura 23 Selección tipo de engranes Datasheet NEMA 34.....	61
Figura 24 Conjunto tornillo sin fin corona	67
Figura 25 Longitud establecida tornillo sin fin	69
Figura 26 Ecuación ancho de cara	72
Figura 27 Coeficiente de fricción para engranes según AGMA.....	74
Figura 28 Factor de corrección.....	78
Figura 29 Factor de velocidad.....	78
Figura 30 Esquema flecha del brazo derecho y corona	80
Figura 31 Esquema de momentos por torsión aplicados en flecha	81
Figura 32 Momentos torsores resultantes	83
Figura 33 Esquema de cargas puntuales aplicadas en flecha.....	83
Figura 34 Momentos flectores resultantes.....	84
Figura 35 Factor de Lewis.....	91
Figura 36 Dimensiones de la chaveta	93
Figura 37 Esquema apoyos C, D.....	97
Figura 38 Esquema Apoyos A, B, E.....	97
Figura 39 Diseño 3D soportes para bolsa de aire (AMBU).....	100
Figura 40 Diseño 3D brazos de aplastamiento AMBU.....	100
Figura 41 Diseño en 3D ubicación y fijación motor	101
Figura 42 Diseño 3D soportes elementos electrónicos.....	102
Figura 43 Diseño 3D ubicación y brazos de aplastamiento.	103
Figura 44 Diseño 3D placas de soporte para rodamiento, ubicación rodamiento.....	103
Figura 45 Diseño 3D acople motor-tornillo sin fin.....	104

Figura 46 <i>Bloque de válvulas de seguridad</i>	107
Figura 47 <i>Válvula de sobrepresión</i>	107
Figura 48 <i>Esquema funcionamiento válvula de seguridad por presión a 110 mbar</i> . 108	
Figura 49 <i>Esquema de funcionamiento por activación de solenoide</i>	108
Figura 50 <i>Esquema de funcionamiento válvula de sobre presión</i>	109
Figura 51 <i>3D Tapa para ajuste de solenoide</i>	110
Figura 52 <i>3D Bloque inferior</i>	110
Figura 53 <i>3D Bloque superior</i>	110
Figura 54 <i>3D Paca de alivio con resorte</i>	111
Figura 55 <i>3D Esquema de solenoide</i>	111
Figura 56 <i>Corte Transversal bloque ensamblado</i>	111
Figura 57 <i>3D Guía placa de empuje</i>	112
Figura 58 <i>3D placa de empuje soporte</i>	112
Figura 59 <i>3D Perno de soporte interno</i>	112
Figura 60 <i>3D Resorte interno válvula de seguridad</i>	113
Figura 61 <i>3D Bloque válvula de seguridad</i>	113
Figura 62 <i>3D Corte Transversal válvula de seguridad</i>	113
Figura 63 <i>Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 1</i>	114
Figura 64 <i>Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 2</i>	115
Figura 65 <i>Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 3</i>	115
Figura 66 <i>Simulación de movimiento de fluido Válvula sobrepresión posición 1</i>	116
Figura 67 <i>Estructura Ventilador emergente modelo preliminar MDF</i>	117
Figura 68 <i>Elaboración corona M20 duralón</i>	118

Figura 69 Montaje tornillo sin-fin/corona M20	119
Figura 70 Tornillo sin fin corona $m=2$ $i=15$ en impresión 3D.....	120
Figura 71 Funcionamiento con sistema de transmisión en PLA+.....	120
Figura 72 Momento de la falla del sistema de transmisión sin fin corona.....	121
Figura 73 Tornillo sin fin y corona después de la falla por resistencia.	121
Figura 74 Acople de duralón instalada.....	122
Figura 75 Brazos de aplastamiento en acrílico de 9 mm.....	123
Figura 76 Soportes para bolsa de respiración AMBU.....	123
Figura 77 Esquema final del equipo ensamblado.....	124
Figura 78 Soportes para sistema de transmisión en acero A36.....	125
Figura 79 Estructura cortada en acrílico de 9 mm.....	125
Figura 80 Equipo ensamblado en acrílico de 9 mm.	126
Figura 81 Tornillo sin fin AISI8620 cementado, corona bronce SAE40.....	127
Figura 82 Ensamble sistema de transmisión- motor.....	127
Figura 83 Flecha fabricada en acero K110.....	128
Figura 84 Desgaste de conjunto sin fin corona sin lubricación.....	128
Figura 85 Lubricación en conjunto sin fin corona.	129
Figura 86 Prueba de funcionamiento tanque de lubricación.....	129
Figura 87 Acople en acero AISI 1045.....	129
Figura 88 Soporte tornillo sin fin y brazo de aplastamiento.	130
Figura 89 Soportes en acrílicos ensamblados con nervio.....	131
Figura 90 Ubicación accesorios en el equipo.....	134
Figura 91 Parámetros de calidad en el software Ultimaker Cura	136

Figura 92 <i>Parámetros de espesor en paredes en el software Ultimaker Cura.....</i>	136
Figura 93 <i>Parámetros de rellenos en el software Ultimaker Cura.....</i>	137
Figura 94 <i>Parámetros de temperatura en el software Ultimaker Cura.</i>	137
Figura 95 <i>Parámetros de velocidad en el software Ultimaker Cura.....</i>	138
Figura 96 <i>Parámetros para soportes en el software Ultimaker Cura.</i>	138
Figura 97 <i>Impresión 3D en impresora marca TEVO TARANTULA.....</i>	139
Figura 98 <i>Elementos de válvulas de seguridad impresas en 3d.</i>	139
Figura 99 <i>Funcionamiento del equipo prueba 1.</i>	140
Figura 100 <i>Desgaste de la corona después de 3 horas.</i>	141
Figura 101 <i>Funcionamiento del equipo prueba 2 </i>	142
Figura 102 <i>Sensor de humedad y temperatura DHT11.....</i>	143
Figura 103 <i>Funcionamiento del equipo prueba 4 </i>	144
Figura 104 <i>Funcionamiento del equipo prueba 5.</i>	144
Figura 105 <i>Comportamiento de la temperatura del motor respecto al tiempo.</i>	146
Figura 106 <i>Posición de los brazos de aplastamiento en distintas horas.....</i>	147
Figura 107 <i>Comparación graficas de posición en distintas horas.</i>	148
Figura 108 <i>Funcionamiento del equipo prueba 6.</i>	149
Figura 109 <i>Ensamblaje bloque de válvulas de seguridad impresión 3D / Original. ...</i>	150
Figura 110 <i>Ensamblaje válvula de sobrepresión impresión 3D/ Original.....</i>	150
Figura 111 <i>Válvula de sobrepresión instalada.</i>	151
Figura 112 <i>Bloque de válvulas de seguridad instalada.</i>	151
Figura 113 <i>Panel de control respirador Hamilton Galileo.</i>	152

RESUMEN

En diversas partes del mundo se presentaron iniciativas para la construcción de ventiladores emergentes, capaces de asistir a pacientes afectados por COVID- 19 en la actual pandemia. Las diversas instituciones que presentaron dichas iniciativas liberaron sus diseños al público para su estudio, fabricación y mejora. Ventiladores de este tipo aún son necesarios en la pandemia, por lo que se requieren métodos de fabricación, materiales, costos adaptados al mercado local y estudio de control de respiradores emergentes. Por otra parte, la ingeniería inversa y la reparación de equipos profesionales, puede ser también de ayuda para mitigar la falta de respiradores, por lo que también resulta necesario la construcción de elementos indispensables en respiradores comerciales, tales como las válvulas de seguridad y sobrepresión. Con el fin de sumarnos a las iniciativas de desarrollo y construcción de ventiladores emergentes, en el presente proyecto se definió el diseño de un prototipo funcional, reducción de costos basados en el mercado ecuatoriano, cálculos mecánicos, construcción, comprobación de funcionalidad y evaluación del comportamiento mecánico de los elementos, tomando como base el modelo del Massachusetts Institute of Technology. Paralelamente se realizó una ingeniería inversa de válvulas mecánicas esenciales de un respirador comercial Galileo. Se replicó la geometría de las mismas en materiales de bajo costo para realizar pruebas de ensayo y error, evaluar el comportamiento de las nuevas válvulas en el respirador comercial, y definir si las mismas pueden ser usadas como repuestos de las válvulas originales, con la finalidad de reparar el equipo en caso de falla.

Palabras clave

- **VENTILADOR EMERGENTE**
- **SISTEMA DE TRANSMISIÓN**
- **VÁLVULAS**

ABSTRACT

In various parts of the world, initiatives were presented for the construction of emergency ventilators, capable of assisting patients affected by COVID-19 in the current pandemic. The institutions that presented these initiatives released their designs to the public for study, manufacture and improvement. Ventilators of this type are still needed in the pandemic, therefore manufacturing methods, materials, costs adapted to the local market and a control study of emerging respirators are required. On the other hand, reverse engineering and the repair of professional equipment can also be of help to mitigate the lack of respirators, which is why it is also necessary to build elements in commercial respirators, such as safety- and overpressure valves. In order to join the development and construction initiatives of emergency ventilators, in this project the design of a functional prototype, cost reduction based on the ecuadorian market, mechanical calculations, construction, functionality verification and behavior evaluation were defined. Mechanical elements are based on the model of the Massachusetts Institute of Technology. In parallel, a reverse engineering of mechanical valves of a Galileo commercial respirator was performed. Their geometry was replicated in low-cost materials to carry out trial and error tests, to evaluate the behavior of the new valves in the commercial respirator, and to define if they can be used as spare parts for the original valves, with the purpose to repair the equipment in case of failure.

Keyword

- **EMERGENCY VENTILATOR**
- **DRIVE SYSTEM**
- **VALVES**

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

Antecedentes

El estudio en base a equipos de respiración artificial tomó un impulso notable a raíz de la pandemia presentada a finales del año 2019, esto debido a que, centros de salud en diversas partes del mundo presentaron dificultades por falta de ventiladores mecánicos, impidiéndoles asistir de manera adecuada a pacientes graves instalados en sus unidades de cuidados intensivos (Wallace, 2020). Alrededor del mundo surgieron diversas iniciativas de investigación, desarrollo y fabricación de respiradores artificiales. Un buen repositorio para la verificación de proyectos y recursos de ventiladores de código abierto se puede encontrar en el proyecto de verificación de ventiladores publicado por PUBINV (Read, 2020). Entre estas podemos destacar a: Medtronic, quien a finales de marzo del 2020 compartió públicamente las especificaciones de su diseño de ventilador Puritan 560, para permitir evaluaciones de rápida fabricación en industrias con el fin de ayudar a los sectores de salud (Newswire, 2020); Ambovent dirigida por la unidad 108 de la Fuerza Aérea de Israel, cuenta con un dispositivo de aplastamiento de una bolsa de aire, el cuál es capaz de controlar frecuencia respiratoria, volumen y presión máxima proporcionada por el equipo, y está diseñado como un ventilador de emergencia automático con un código abierto para permitir una producción en masa (Ambovent., 2020); MIT E-vent es un ventilador emergente diseñado por parte del MIT, cuya finalidad es automatizar la ventilación manual como una solución a corto plazo, proporcionando al personal médico la capacidad monitorear y controlar el equipo, y adaptarlo a los parámetros individuales de cada paciente con problemas respiratorios, el diseño de este se liberó con la finalidad de, brindar las herramientas necesarias para su fabricación garantizando la seguridad del paciente (Technology, 2020).

Enfocándonos contexto local, así como al resto el mundo, la pandemia afectó significativamente al sistema de salud en el país como se pueden observar en informes presentados por parte del COE nacional (Nacional, 2020), por lo que iniciativas similares se presentaron como, por ejemplo: SURKAN, Ubuntu Respira (Naranjo, 2020). Así como las anteriores iniciativas, un equipo perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE conformado por ingenieros y estudiantes de los departamentos de ciencias exactas, ciencias de la energía y mecánica, electrónica y el centro de investigación de aplicaciones militares CICTE- ESPE, se sumó al desarrollo de ventiladores emergentes a partir del mes de marzo del 2020.

Como conclusión, el enfoque general de estas iniciativas, es presentar el diseño de ventiladores capaces de ser producidos en masa para su uso en casos de emergencia, por lo que su costo de fabricación es bajo en relación a otros ventiladores. Otra de las características importantes de estos ventiladores, es que cuentan con un sistema que les permita controlar diversos parámetros en su funcionamiento, tales como: velocidad de flujo de aire, presión de entrada del flujo y relación de espiración e inspiración de aire, lo que permitirá al personal que los opere la facilidad de adaptar los parámetros a las necesidades de cada paciente.

Es requerido continuar con el desarrollo de ventiladores emergentes utilizando como base las iniciativas anteriores, con el fin de igualar y/o mejorar su calidad diseño, adaptar su fabricación al mercado local en busca de mejores costos y que se ajuste a las necesidades de cuidado para pacientes con COVID – 19 y otras afectaciones pulmonares que lo requieran, así como también restaurar elementos de respiradores existentes y recuperar su funcionamiento.

Definición del problema

El coronavirus causante de la pandemia fue nombrado SARS-CoV2, el cual causa la enfermedad conocida como COVID-19 y estalló su brote en Wuhan (China) en diciembre del 2019. El SARS-CoV2 es un virus de transmisión por contacto, su contagio es posible a través de secreciones respiratorias de personas infectadas (por medio de tos o estornudo), o contacto con superficies u objetos contaminados con el mismo. Los síntomas destacados de esta enfermedad son problemas respiratorios (incrementados gradualmente), derivando en enfermedades respiratorias agudas y neumonía grave (Wallace, 2020).

A causa de esto se presentaron complicaciones a nivel hospitalario, en su mayoría por falta de respiradores en unidades de cuidados intensivos. Por lo que se presentaron soluciones alternativas, como lo son los respiradores emergentes de código abierto, estos tienen como finalidad una fácil fabricación y bajo costo para su producción en masa, para lo cual es necesario adaptar prototipos existentes a la realidad nacional, tomando en cuenta recursos tanto de materiales, como de fabricación. De igual manera se planteó recuperar elementos mecánicos en respiradores existentes.

Por lo que en el presente proyecto se plantea el rediseño y construcción de los componentes para respiradores de emergencia, basándose en los diseños de ventiladores de emergencia liberados por el MIT, con lo que se busca aportar a la línea de investigación y aplicar los conocimientos adquiridos a través de los años de estudio, elaborando un equipo ventilador mecánico funcional adaptado al mercado ecuatoriano.

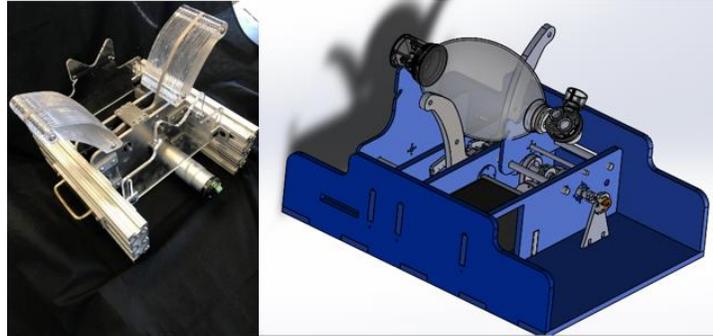
Entre los componentes a elaborar tenemos:

- Estructura del ventilador.
- Sistema de transmisión de Movimiento.

- Soportes para bolsa de aire (Ambu) de diferentes medidas.
- Adecuación de estructura para componentes electrónicos.

Figura 1

Respirador MIT / Diseño propuesto



Nota: Tomado de (MIT, 2020) /Autor

También se plantea la ingeniería inversa de componentes mecánicos (válvulas de presión) pertenecientes al respirador Galileo PN 610207/05. Estas válvulas no presentan una posibilidad de reparación, por lo que, en caso de avería, será necesario construir una réplica, para esto es necesario conocer su funcionamiento, forma de fabricación, geometría, así como también componentes que permiten el correcto funcionamiento dentro de un ventilador Galileo, estas válvulas son:

- Bloque de válvulas de seguridad.
- Válvula de sobrepresión.

Los detalles de las válvulas, así como su función se encontrarán en el capítulo 2.

Con la construcción de las mismas, se realizará una comprobación del correcto funcionamiento en cada una para su utilización en el respirador Galileo.

Objetivos

Objetivo general:

- Diseñar elementos mecánicos de la estructura, soportes de elementos móviles, sistema de transmisión del motor a los brazos para respiradores de emergencia, y en respiradores comerciales, los sistemas de alivio de sobrepresión y de flujo principal de aire.

Objetivos específicos

- Definir las dimensiones, características y material de construcción de los complementos mecánicos para respiradores comerciales que comprende el bloque de válvula de seguridad del sistema principal de flujo de aire y la válvula de alivio de sobrepresión del tanque correspondiente al sistema alivio de sobrepresión de flujo.
- Fabricar las válvulas de los sistemas de flujo principal de aire y de alivio de sobrepresión correspondientes al ventilador comercial Galileo.
- Evaluar el funcionamiento del bloque de válvula de seguridad y la válvula de alivio de sobrepresión del tanque mediante pruebas de presión en el respirador Galileo.
- Definir un diseño funcional y de bajo costo para la estructura mecánica, soportes para Ambu, ejes, sistema de transmisión de movimiento, estructura para elementos electrónicos y elementos de sujeción en respiradores de emergencia.
- Manufacturar la estructura mecánica, elementos del sistema de transmisión de movimiento y de aplastamiento del Ambu para el respirador de emergencia conforme a los diseños realizados.

- Evaluar el cumplimiento de los requerimientos de presión y flujo planteados, mediante un protocolo de pruebas en laboratorio, además de evaluar el comportamiento mecánico de los elementos.

Justificación e importancia

Desde el punto de vista técnico los respiradores, ya sean estos comerciales o respiradores de emergencia son fundamentales para enfrentar la emergencia sanitaria provocada por el Covid-19, ya que esta causa graves problemas respiratorios en los pacientes afectados. Por esto el entender el funcionamiento de los respiradores y poderlos fabricar de manera rápida a bajo costo, es vital dado que los respiradores disponibles en el sistema hospitalario son escasos.

Un respirador comercial, es una máquina de accionamiento eléctrico, controlado mediante microprocesador- electromagnético o neumático, diseñado para suplir la ventilación pulmonar espontánea por una ventilación mecánica en personas con dificultades respiratorias. Los mismos constan en su diseño de válvulas de seguridad, sistemas de monitoreo, mangueras de distribución y filtros de aire, como parte propia de su diseño.

Expresado de forma simple, un ventilador comercial consta de los siguientes elementos:

- Turbina o Depósito de compresión.
- Fuente de aire y oxígeno.
- Conjunto de válvulas y tubos.
- Circuito o equipo de conexión al paciente.

Un respirador de emergencia o respirador de código abierto, es un respirador orientado a situación de desastre, con un diseño enfocado en: componentes, piezas y licencias gratuitas o de bajo costo.

Estos respiradores constan en general de:

- Sistema de aplastamiento, por medio de brazos de aplastamiento.
- Motor.
- Ambu (Bolsa de aire).
- Sistema de transmisión de movimiento.
- Sensores electrónicos para control y medición.

El diseño y construcción tanto de las válvulas de seguridad y sobrepresión, como de componentes mecánicos para respiradores emergentes, resultan primordiales para observar su factibilidad de construcción y funcionalidad.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

Respiradores

Un respirador o ventilador es una máquina que sirve para facilitar la respiración de una persona o también respirar por la misma en caso de que el paciente no puede hacerlo, a este tipo de ventilación se la conoce como ventilación mecánica, entre sus principales características tenemos:

- Está conectado a una computadora que cuenta con su respectivo panel de control el cual opera una persona calificada, ya sea un terapeuta respiratorio, un médico o el personal de enfermería.
- Cuenta con sondas que a través de un tubo de respiración se conectan al paciente, este tubo es colocado en la boca de la persona o de no ser posible también se puede realizar una traqueotomía, que es en una abertura a través del cuello hasta la tráquea y mediante esta se conecta el tubo de respiración.
- Posee alarmas que sirven para alertar al equipo médico que se requiere atención, ya sea para cambiar un parámetro en el equipo o cualquier otro fallo que se presente.

Figura 2

Paciente con respiración asistida



Nota: Tomado de (FINUT, 2020)

El proceso de colocar a las personas en un respirador al no ser capaces de respirar por si mismos puede deberse a alguna de las razones a continuación:

- El paciente sufre de alguna lesión o enfermedad como actualmente puede ser el Covid 19, que principalmente produce afectación a el sistema respiratorio y esto no le permite respirar con normalidad.
- Como una forma de constatar que una persona está recibiendo el oxígeno suficiente y a su vez eliminando CO₂.
- En ciertas ocasiones después de una cirugía los pacientes no retoman su respiración normal, y si se les administra medicamentos que les produce sueño, es requerido un respirador.

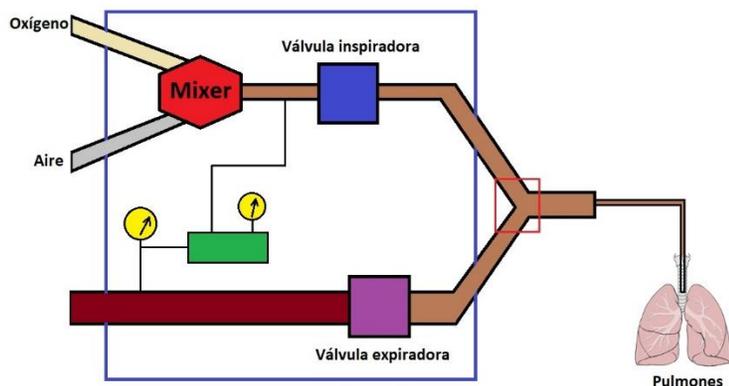
Generalmente estos respiradores se necesitan por periodos cortos de tiempo, desde pocas horas hasta un par de semanas, pero existe casos graves en donde se necesitan por periodos más largos como meses e incluso años.

Funcionamiento de respiradores

Los respiradores artificiales necesitan generar el flujo de aire requerido por el paciente, para esto cuentan con una turbina que es la encargada de suministrar el aire, pero al ser requerida una mezcla de gases en el interior del respirador, se requiere que esté conectado a una toma de oxígeno y otra toma de aire, que mediante un mixer se realiza la mezcla necesaria que depende de cada caso Figura 3 y es regulada por el personal médico, luego esta mezcla pasa por la válvula inspiratoria que regula el paso de la mezcla al paciente, y para la expiración del paciente también cuenta con una válvula espiradora que controla las fases respiratorias, y la presión positiva al final de la expiración (Hamilton, 2019).

Figura 3

Funcionamiento básico de un respirador artificial



Nota: Tomado de (Satelital, 2020)

Se encuentran compuestos principalmente por tres partes:

- Bloque electrónico.
- Bloque neumático.
- Sistema de control.

Todos estos sistemas trabajan de manera conjunta dependiendo de los requerimientos del paciente, que son manualmente indicados por el personal médico a cargo. El uso de los diferentes ventiladores/respiradores varía de acuerdo a las necesidades y gravedad de cada paciente.

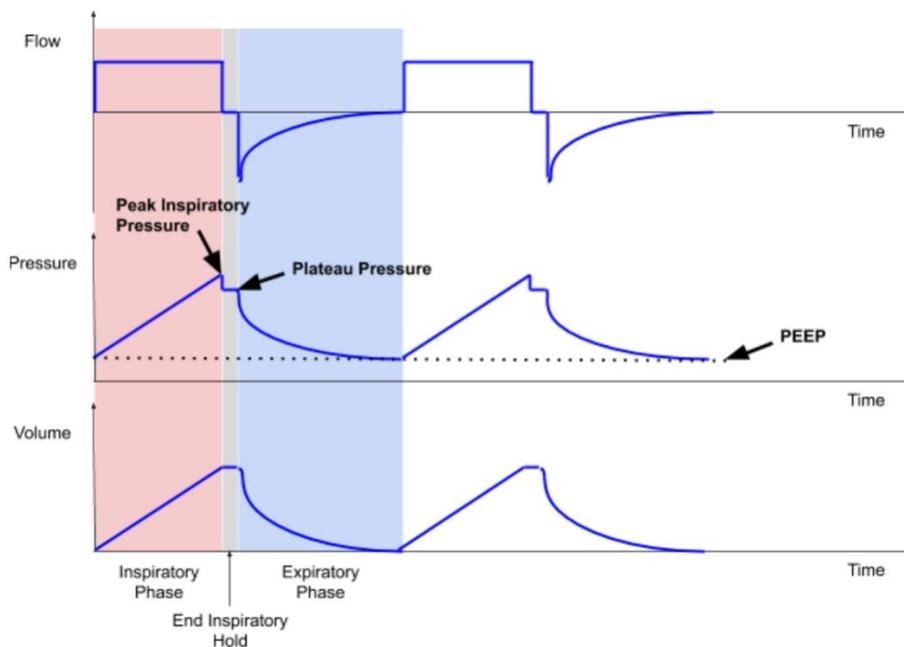
Por lo general, y cuando el caso no requiere de medidas radicales se utiliza una mascarilla que cubre la boca y nariz, que de forma continua va proveyendo de oxígeno a la persona, es decir un sistema no invasivo. (Aegon, 2020).

Fases durante el proceso de respiración

Para poder controlar un equipo de ventilador emergente, es necesario conocer las fases durante el proceso de respiración. Como podemos observar en la figura.

Figura 4

Funcionamiento básico de un respirador artificial



Nota: Tomado de (MIT, 2020)

Durante la fase de inspiración, ingresa un flujo constante conformado por la mezcla de aire y oxígeno, el cual produce un incremento en el volumen dentro de los pulmones incrementando también la presión en los mismos. Una vez finalizada esta fase se detiene el ingreso del fluido manteniendo el volumen constante, anulando la presión resistiva en el interior de los pulmones y provocando una pequeña caída de presión, esto con el fin de controlar la presión durante la fase de inspiración. Posteriormente en la fase de espiración, se libera el flujo, así como el volumen en el interior de los pulmones provocando un alivio de la presión interna.

Tipos

De acuerdo a la situación que se requiera afrontar existen diferentes tipos de respiradores, que van desde los menos invasivos como la ventilación de oxígeno, hasta los invasivos como respiradores pulmonares o artificiales que también son denominados como mecánicos

Dependiendo del entorno en el que van a operar se pueden clasificar como:

- Respiradores de UCI.
- Respiradores de emergencias.
- Respiradores de transporte o anestesia.

Los ventiladores o respiradores mecánicos requieren bastante tiempo y esfuerzo en su fabricación, ya que son máquinas muy sofisticadas y de gran precisión que cuentan con instrumentos complejos. Son estudiados y diseñados con tecnología avanzada al más mínimo detalle, esto garantiza que sean fiables y efectivos.

Figura 5

Paciente conectado a un respirador mecánico UCI



Nota: Tomado de (Wallace, 2020)

Componentes

- **Panel de programación:** Aquí se configura el método de ventilación y oxigenación requerido, en el mismo se monitorean los cambios producidos en los parámetros de operación.

- **Sistema electrónico:** Se conforma por un conjunto de procesadores electrónicos cuya función es permitir el almacenaje, conversión digital/analógica, monitoreo y control de las funciones disponibles.
- **Sistema neumático:** Son un conjunto de componentes que permiten la mezcla de oxígeno/aire, la espiración, el flujo durante la inspiración, además de administrar los volúmenes de aire y medir las presiones.
- **Sistema de suministro eléctrico:** Puede ser interno a una batería recargable y/o con conexión a una fuente externa capaz de suministrar la energía requerida.
- **Sistema de suministro de gases:** Suministra oxígeno, aire y en algunos modelos más actuales óxido nítrico y otros gases medicinales.
- **Circuito del paciente:** Permite conectar al paciente con el respirador, todos los sistemas de carácter invasivo tendrán dos vías unidas por un elemento en Y Figura 3, una vía inspiratoria que va del equipo al paciente y una vía espiratoria que va desde el paciente hacia la válvula espiratoria. (Aegon, 2020).

Sistema de transmisión

Un sistema de transmisión es un conjunto de elementos que se encargan de transmitir una velocidad y potencia de entrada hacia un dispositivo, generando movimiento en el mismo ya sea este rotacional o lineal. Dependiendo del sistema de transmisión se encuentran los siguientes elementos:

Motor eléctrico.

Es un dispositivo electromecánico que es capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica, esta última en forma rotacional. El principio de funcionamiento de un

motor depende en gran medida de la interacción entre el campo eléctrico y el campo magnético. Un motor eléctrico consta de dos elementos esenciales:

- El primero denominado estator es un componente estático que consiste en conductores eléctricos y materiales magnéticos para generar campos magnéticos.
- El segundo conocido como el rotor, que también está formado por conductores magnéticos y eléctricos para generar campos magnéticos que interactúan con los campos del estator. El rotor se compone de un medio para mantener el contacto eléctrico entre la carcasa del motor y el rotor, y el componente móvil del motor que tiene un eje giratorio que se conecta a la máquina que se está impulsando. (Aula21, 2020).

Los motores eléctricos se los puede clasificar principalmente en dos categorías, las cuales dependen de qué tipo de energía eléctrica es aplicada, pueden ser motores de corriente alterna (AC) y motores de corriente continua (DC).

Entre estos tipos de motores, para la aplicación de un respirador en donde no se requiere rotación continua, sino que se necesita giros pequeños y controlados, un motor paso a paso de corriente continua (DC) es el tipo que mejor se adapta. Este motor destaca por poder posicionarse con precisión sin un sensor de retroalimentación, moverse con precisos incrementos angulares, rotar en ambas direcciones y controlarse con circuitos digitales (MecatrónicaLatam, 2021).

El torque que ofrece un motor es una de las variables más importantes a considerar en la selección del motor, por eso se debe conocer la variación el torque en relación al número de revoluciones, estos valores se pueden conocer en el datasheet del motor.

Caja reductora

Es un mecanismo de transmisión, el cual está compuesto por una serie de elementos mecánicos, que permiten la correcta reducción de velocidad y el aumento de la transmisión del toque o par. Todos sus elementos como engranajes, arandelas, casquillos, piñones, coronas, poleas, son igualmente importantes y necesitan de una excelente composición y geometría para operar de manera correcta.

Engranajes

Un tren de engranajes es un conjunto de dos o más ruedas dentadas, que tienen en contacto sus dientes de tal forma que cuando gira una giran las demás, es el medio más común de transmisión de potencia, entre sus principales ventajas se tienen:

- Transmiten grandes esfuerzos.
- Las ruedas no pueden resbalar entre sí.
- Se conserva constante la relación de transmisión.

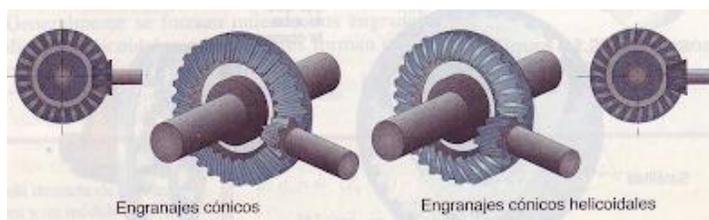
Al engranaje que transmite el movimiento se le denomina piñón, y al que recibe el movimiento se denomina rueda, la transmisión del movimiento se puede dar de dos modos esto según la disposición de los ejes que pueden ser paralelos o perpendiculares.

Los engranajes de ejes perpendiculares tienen sus superficies primitivas tronco-cónicas, esta configuración permite transmitir grandes esfuerzos, pero esto conlleva a que se generen grandes fuerzas axiales, estos suelen ser:

- De dientes rectos: engranajes cónicos.
- De dientes helicoidales: engranajes cónicos helicoidales.

Figura 6

Engranajes de ejes perpendiculares



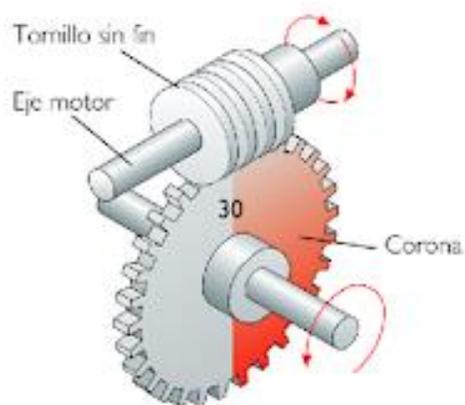
Nota: Tomado de (Torres, 2010)

Tornillo sin fin corona

Dentro de los conjuntos de ejes perpendiculares uno que destaca por su tamaño reducido y grandes relaciones transmisión, es el sistema tornillo sin fin corona.

Figura 7

Tornillo sin fin corona



Nota: Tomado de (Londin, 2018)

El tornillo sin fin es un elemento cilíndrico que tiene de uno o varios filetes también conocidos como entradas enrolladas de forma helicoidal, la corona a su vez es una rueda dentada con dientes de forma helicoidal y su ángulo de inclinación debe coincidir con el ángulo de los filetes del tornillo sin fin.

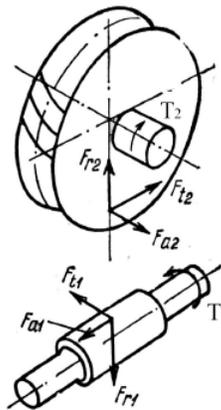
Este conjunto transmite el movimiento entre dos ejes perpendiculares, por lo cual un sin fin siempre será el elemento motor y a su vez una corona actuará como conducido. Su principal ventaja es ofrecer una gran reducción de velocidad de rotación y por consecuente también un gran aumento en el torque transmitido.

Para el diseño del conjunto primero se requiere calcular sus parámetros geométricos, tanto para su manufactura como para cálculos posteriores, como las fuerzas que actúan en el mismo.

Las fuerzas presentes en el conjunto son equivalentes numéricamente entre el tornillo sin fin y la corona, sin embargo, están dispuestas de acuerdo a la Figura 8, donde la fuerza axial del tornillo sin fin es equivalente a la fuerza tangencial de la corona, la fuerza tangencial del sin fin es equivalente a la fuerza axial de la corona y las fuerzas radiales son equivalentes entre sí.

Figura 8

Esquema fuerzas resultantes en un tornillo sin fin corona



Nota: Tomado de Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sin fin corona Juan Arroyave

Lubricación de un tornillo sin fin corona

El objetivo de los lubricantes en un sistema, es formar una capa de protección entre superficies para evitar factores como desgaste, corrosión, entre otros. En general cuando las condiciones del sistema exceden la resistencia de la capa de aceite, estos sirven como un elemento de sacrificio para proteger la pieza. El adecuado componente de lubricación debe ser seleccionado con cuidado, ya que dentro de un sistema de transmisión pueden existir varios factores alternantes que afectarán al aditivo seleccionado.

Dentro de las formas de lubricación tenemos:

- Lubricación por aceite perdido: Está crea y mantiene una película delgada de aceite lubricante ubicada en medio de las partes móviles, tiene que ser renovada mediante un sistema de lubricación centralizada a intervalos regulares.
- Lubricación por grasa: Posee un gran campo de aplicaciones tanto en máquinas de pequeño y gran tamaño, así como en gran variedad de bombas e incluso diseños de maquinaria personalizadas siendo está una de las más rentables. A diferencia de la lubricación por aceite, esta limita al máximo la fuga del aditivo por entre los elementos en movimiento, pero en consecuencia posea una limitada vida útil y de igual manera su capacidad de refrigeración es inferior a la lubricación por aceite.
- Lubricación por recirculación de aceite: Esto implica un flujo continuo del aditivo de lubricación, este mismo es recogido en un tanque reservorio para posteriormente ponerlo nuevamente en circulación hacia el punto de lubricación. La desventaja de estos sistemas de lubricación es que requiere complementos

para el enfriamiento y calentamiento del aceite, para poder mantener una temperatura óptima del lubricante.

Existen diversos casos en los que se puede aplicar un sistema de lubricación y cada uno de estos con diferentes requerimientos, por lo que resulta importante la correcta elección de un lubricante adecuado, entre los cuales tenemos:

- Aceites: Presentan una buena cobertura y tienen capacidad de fluencia, a menudo usado para altas revoluciones y temperatura.
- Grasas: Constan de un aceite en forma de base ligado a un aditivo espesante, de manera que la misma permanezca en el punto de lubricación y pueda sellarlo contra agentes externos como por ejemplo la humedad.
- Pastas: Similar a las grasas garantiza mayor lubricación en desmoldeo y protección contra corrosiones.
- Lubricantes secos: Se pueden clasificar como lacas con cuerpos sólidos y lubricantes en polvo con películas similares a cera.

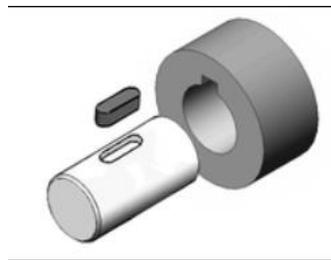
Uno de los retos más grandes en el sistema de un tornillo sin fin corona se conoce como lubricación a película límite, la cual consiste en una reducción de la fricción centrada en los efectos ocasionados por desgaste, estas aplicaciones puede requerir un lubricante específico con base mineral comúnmente conocido como aceite compuesto. La composición del mismo se forma con un aproximado de hasta 10% de ácidos grasos también llamado aceite natural, o en su defecto grasas animales no ácidas, junto a estos se utilizan inhibidores de herrumbre y oxidación. Esta composición da como resultado una mejora en la lubricación y una reducción de la fricción considerable, así como demorando el desgaste por deslizamiento.

Chavetas

Una chaveta es un elemento de máquina generalmente fabricado en acero al carbono, y cuya función es fijar dos piezas para evitar que por ejemplo ruedas dentadas, poleas, volantes, entre otros, giren alrededor de sus respectivos ejes.

Figura 9

Representación de chaveta y chavetero



Nota: Tomado de (BIRTLH, 2015)

Para colocar las chavetas se realizan ranuras en los ejes conocidas como chaveteros, la chaveta sobresale de la superficie del eje para poder encajarse en el chavetero de la rueda como se ve en la Figura 9, de este modo los dos elementos unidos giran a la par (Borja, 1990).

Consideraciones

Para seleccionar una chaveta se tienen las siguientes consideraciones:

- El tipo de falla es por aplastamiento por esto se debe analizar si soporta este esfuerzo.
- El material de la chaveta debe ser de menor resistencia que el material de los demás elementos, debido a que es preferible que falle la chaveta a que lo hagan elementos más complejos de manufacturar.
- La longitud máxima debe ser de 1,5 veces el diámetro del eje en el que se ensambla, con el propósito de evitar torceduras en la chaveta (Nisbett, 2008).

La chaveta más simple geoméricamente es la cuadrada, esto permite que su manufactura no sea muy compleja, además su ensamble también es bastante sencillo.

Rodamientos

El rodamiento es un elemento mecánico, cuya función es reducir la fricción entre un eje y los elementos conectados al mismo mediante un apoyo para así facilitar desplazamiento.

Partes

Los rodamientos constan principalmente de las siguientes partes:

- Anillo exterior e interior.
- Elementos rodantes que pueden ser de bolas, conos, rodillos o agujas, suelen ser de aleación de acero y cromo, giran sobre las pistas formadas por los anillos y separados por la jaula.
- Una jaula que mantiene separados los anillos de los elementos rodantes, suele ser de latón, acero o plástico.

Figura 10

Partes de un rodamiento



Nota: En la figura los elementos mostrados son: a) anillo interno, b) anillo externo, c) jaula, d) elementos rodantes; Fuente: (NSK, 2016).

Tipos

Existen muchos tipos de acuerdo a la aplicación, aunque podemos clasificarlos en cuatro tipos principales:

- **Rodamientos de bolas:** Son la opción más extendida, que cuentan con una gran variedad de variables y una amplia gama de aplicaciones, de esto último y de la carga aplicada depende su selección, entre los más comunes están los axiales, rígidos de bolas, de contacto angular, de bolas autoalineables y de bolas de contacto angular de alta velocidad.
Tienen como principales características su capacidad de trabajar a altas velocidades, mayor capacidad de carga radial, poco mantenimiento requerido, baja capacidad de carga axial.
- **Rodamientos de agujas:** Cuenta con rodillos cilíndricos, largos y finos, especialmente usados en aplicaciones donde el espacio es limitado, se caracteriza por tener la dimensión axial mayor que la dimensión radial en sus agujas, son idóneas para la transmisión que requiere una carga radial elevada.
- **Rodamientos de rodillos:** Están conformados por rodillo enjaulados entre el anillo exterior e interior y dispuestos en una hilera, La jaula ayuda a evitar fricciones ya que no permite el contacto entre los cilindros al momento de girar, con lo cual resiste rápidas aceleraciones en altas velocidades, principalmente se diferencian de los rodamientos de bolas ya que estos soportan altas cargas radiales, además son fáciles de montar y desmontar siendo muy versátiles.
- **Rodamientos axiales:** Como lo indica su nombre son dedicados a soportar cargas solamente axiales por lo cual no debe operar con cargas radiales, pueden ser de tipo simple y doble.

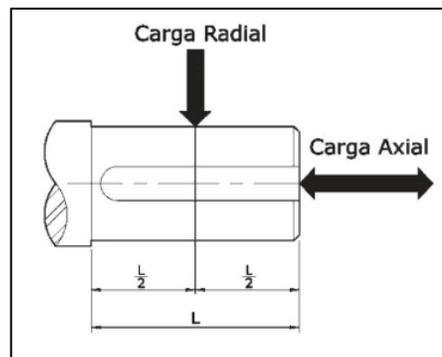
Cargas en rodamientos

En los sistemas de transmisión donde se generan cargas axiales y radiales es importante verificar si los rodamientos soportan estas cargas, ya que ayudan al eje a soportar las fuerzas aplicadas o combinaciones de las mismas, así evitando que se excedan los límites requeridos.

- Carga radial es la fuerza que se produce de forma perpendicular al eje.
- Carga axial es la fuerza que se produce de forma paralela al eje.

Figura 11

Esquema de cargas



Nota: Tomado de (CLR, 2016)

Para su selección se requiere el cálculo de la carga estática equivalente, que depende de las fuerzas axiales y radiales aplicadas en el eje Figura 11, para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_o = X_o W_r + Y_o W_a \quad (1)$$

Donde:

X_o y Y_o son coeficientes que dependen del tipo de elemento rodante y se los puede encontrar en los catálogos del fabricante.

W_r y W_a son las fuerzas radial y axial respectivamente.

Fallas por fatiga de cargas variables

Límite de resistencia a la fatiga

El límite de resistencia se puede determinar mediante ensayos a la fatiga, pero resultan procedimientos muy extensos, para un diseño preliminar se requiere un método rápido de estimación, por lo que en la literatura técnica existen grandes cantidades de datos sobre ensayos de tensión y de vigas rotativas. Un método para estimar el límite de resistencia a la fatiga se presenta en el capítulo 6 del libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, en el caso de aceros se puede estimar mediante la ecuación 6-8 de este libro y que se presenta en la Figura 12.

Figura 12

Límite de resistencia a la fatiga

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6-8)$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Donde S_{ut} corresponde a la resistencia a la tensión y S'_e es la resistencia de la flecha rotativa.

Factores que modifican el límite de resistencia

Los ensayos realizados para estimar el límite de resistencia a la fatiga, se los realiza bajo condiciones específicas muy controladas, debido a esto no se puede esperar que la resistencia de elementos mecánicos o estructurales sea igual a estos valores (Nisbett, 2008), por lo cual Joseph Marín en su libro Mechanical Behavior of Engineering Materials estableció varios factores que cuantifican estos efectos, entre los cuales se encuentran:

- **Factor de modificación de condición superficial (ka):** Es un factor que depende de la calidad del acabado superficial y de su resistencia a la tensión, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K_a = aS_{ut}^b$$

- **Factor de modificación del tamaño (kb):** Este factor depende del diámetro de la barra rotativa, para flexión y torsión puede determinarse como:

Figura 13

Factor de tamaño

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

- **Factor de modificación de carga (kc):** Para ensayos de fatiga donde se presente flexión, torsión y carga axial, el límite de resistencia a la fatiga no coincide con la resistencia S_{ut} , por lo tanto, los valores medios del factor de carga se definen como:

Figura 14

Factor de carga

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Nota: Tomado de Libro de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley ecuación 6-26

Estos factores se relacionan con la resistencia mediante la ecuación:

$$S_e = K_a K_b K_c S'_e$$

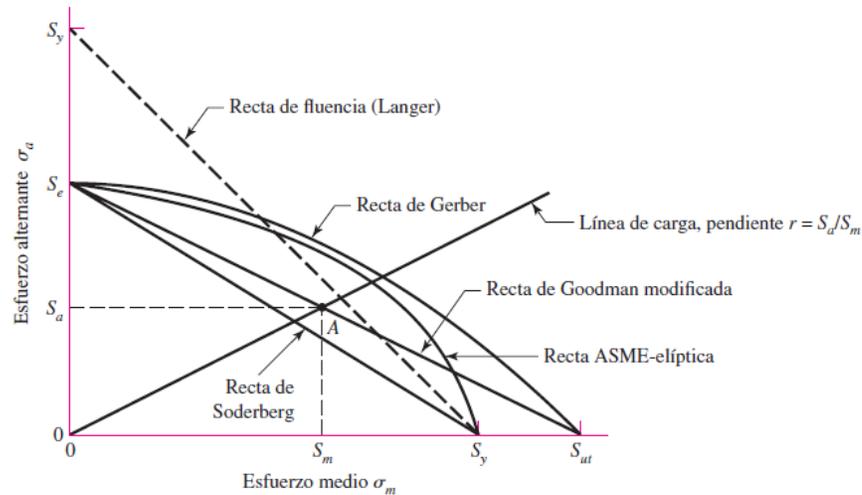
Donde S_e es el límite de resistencia a la fatiga.

Criterios de falla por fatiga

Para el análisis de falla por fatiga existen varios criterios que difieren unos de otros dependiendo de qué esfuerzo consideran para su cálculo, siendo estos los esfuerzos medios σ_m , alternantes σ_a y las propiedades del material S_y , S_{ut} , S_e , en la Figura 15 se poder ver las rectas y curvas que representan estos criterios.

Figura 15

Diagrama de fatiga de varios criterios de falla



Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Principalmente se trabaja con Gerber y ASME en criterios de falla, y se usa Langer para fluencia. No obstante, para diseños conservadores es más común usar el criterio de Goodman modificado (Nisbett, 2008).

Estas curvas tienen también sus ecuaciones representativas que son:

Soderberg:

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y}$$

Goodman modificado:

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}$$

Gerber:

$$1 = \frac{FS \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{FS \sigma_m}{S_{ut}} \right)^2$$

Asme-elíptica:

$$1 = \left(\frac{FS \sigma_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{FS \sigma_m}{S_Y} \right)^2$$

Fluencia estática de Langer:

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_Y}{FS}$$

FS es el factor de seguridad

Manufactura

Es el resultado de convertir materias primas en artículos o piezas elaboradas por un proceso de producción, en la actualidad existen diversos métodos de manufactura los cuales facilitan la elaboración de piezas con mayor complejidad geométrica y a un costo menor con respecto a los procesos convencionales. Entre los procesos mayormente utilizados en este proyecto podemos referenciar los siguientes.

Manufactura por arranque de viruta.

Este proceso de mecanizado, consiste en separar material de una pieza previamente elaborada. El proceso, se realiza mediante en la penetración de una herramienta de corte, realizando un desbaste relativo entre la pieza que se requiere mecanizar y la herramienta. Para esto, el material de la herramienta de corte debe ser una mayor

dureza que el material de la pieza, puesto de esta manera se vencerá la resistencia del material al mecanizado.

Este método de manufactura se produce debido a que el filo de la herramienta deforma elásticamente el material de la pieza a manufacturar, provocando que en el mismo aparezcan tensiones de corte o ralladura que producirá viruta. Esto resulta en una rotura del material y separación de la capa superior por la deformación plástica sufrida.

En el mecanizado por arranque de viruta se dan tres tipos de procesos:

Desbaste: Eliminación de material con baja precisión; requiere de alta velocidad de avance y corte, este un proceso que se utiliza para un maquinado rápido acercándose a las dimensiones finales de la pieza en poco tiempo.

Acabado: Eliminación de poco material; proceso final tiene el objetivo de dar un acabado superficial a la pieza conforme lo requiera su utilización. Para este proceso se trabaja con una velocidad de avance baja y una velocidad de corte alta, con el fin de reducir la rugosidad.

Rectificado o supe acabado: Se utiliza para obtener un buen acabado superficial y medidas muy precisas. Las velocidades tanto de corte como de avance son altas, por lo que esto desprende partículas del material por abrasión.

En este proceso de manufactura se pueden obtener elementos con exactitudes del orden de micras, proporcionando también acabados superficiales excelentes. Tomando en cuenta la teoría de la producción por arranque de viruta, podemos destacar que una de las propiedades más importantes del material que se desea mecanizar es la maquinabilidad, lo que se refiere a la capacidad de arrancar material de una pieza con una herramienta de corte o desbaste, en otras palabras, la capacidad del material de ser mecanizado.

Los materiales idóneos para utilizarse en la manufactura por arranque de viruta son:

- Metales.
- Los plásticos y sus compuestos.
- Los compuestos cerámicos (mecanizado abrasivo).

Entre los tipos de mecanizado por arranque de viruta tenemos:

- Serrado
- Limado
- Taladrado
- Roscado
- Torneado
- Fresado
- Brochado
- Mortajado

Impresión 3d

También llamado manufactura por adición, es el proceso de fabricar objetos a través de la adición de material por capas, correspondiente a secciones transversales conforme se presenta en un previo modelado 3D, donde se usa polímeros y aleaciones metálicas como materiales más frecuentes. Este método de fabricación es una forma eficiente de procesamiento de piezas únicas, con geometrías complejas y tiempos reducidos con respecto a otros procesos de fabricación.

La manufactura por adición requiere de un software de modelado 3D, y uno correspondiente al hardware de la impresora para traducir el modelado en procesamiento de impresión por capas, este último divide el gráfico tridimensional en capas finas con un diámetro correspondiente al material de salida. La impresora calienta

el material y lo va depositando en una cama caliente mientras se desplaza sobre el plano en las coordenadas correspondientes, para formar la figura diseñada previamente.

Los materiales a utilizar en este tipo de impresoras son termoplásticos, entre los que podemos encontrar:

- PLA (Ácido poliláctico): Constituido por elementos similares al ácido láctico y con características similares al PET que se utiliza en varias ocasiones en envases plásticos. Este mismo se encuentra fabricado de almidón de maíz, yuca, mandioca y/o caña de azúcar.
- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno): Polímero termoplástico, posee buena resistencia a temperaturas bajas y su peso es bajo, se usa principalmente en electrodomésticos, decoración y juguetes.
- PLA +: Filamento mejorado en comparación con el PLA, posee una mejor resistencia mecánica y acabado en la impresión, es útil para diversas aplicaciones mecánicas.
- PETG: Uno de los materiales más usados y considerado como un sustituto para el ABS gracias a su buena resistencia química y mecánica.

Las aplicaciones de una impresión 3D son múltiples y pueden ser aplicadas en una gran variedad de campos gracias a sus diferentes técnicas y materiales que pueden ser utilizados, tomando en cuenta ciertos aspectos como lo son la geometría del objeto, precisión de los detalles y resistencia mecánica del mismo. Incluso en la actualidad se realizan pruebas de impresión 3D en hormigón para la construcción de casas y edificios.

Corte Láser

Es una técnica de fabricación la cual consiste en cortar o grabar un material por medio de un láser, este mismo tiene su aplicación en diversos materiales entre los

cuales encontramos plástico, madera, cartón, acero negro, acero inoxidable, cobre y aluminio, todo dependiendo de la potencia del láser disponible en la máquina.

El proceso consiste en cortar un material con alta precisión gracias a un láser concentrado en un área del material, este corte se realiza en un plano de 2 dimensiones, la potencia suministrada al laser da como resultado un rápido calentamiento, lo que termina en una fusión del material afectando la zona de corte con una tolerancia de alrededor 0.5, lo cual debe tomarse en cuenta al momento del diseño del plano de corte para obtener una mejor tolerancia en las piezas finales.

Existen diversos láseres para corte, entre estos encontramos:

- Láser de CO2: Este láser de dióxido de carbono sellado dentro de un tubo de vidrio y activado mediante corriente eléctrica, crea un flujo de fotones.
- Láser de granate de itrio- aluminio dopado con neodimio (YAG): Este láser se bombea usando una lámpara la cual emite un flujo de fotones.
- Láser de fibra: Este láser usa diodos semiconductores como mecanismos de bombeo y una fibra óptica a modo de laser dopada con elemento de tierras raras.

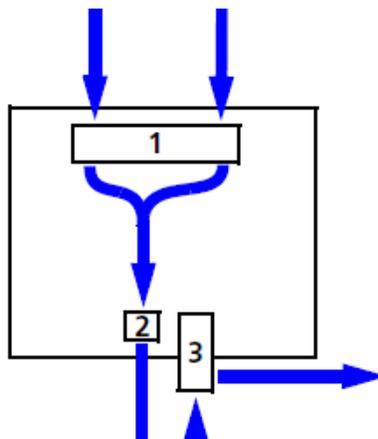
Respirador Hamilton Galileo.

Un respirador Galileo es usado en casos de cuidado intensivo, para proporcionar un flujo de una mezcla de aire y oxígeno al paciente con afectaciones pulmonares.

En el siguiente grafico podemos observar el funcionamiento de un ventilador Galileo, el cuál regulará el flujo de gases en 3 puntos.

Figura 16

Esquema de funcionamiento respirador Hamilton Galileo



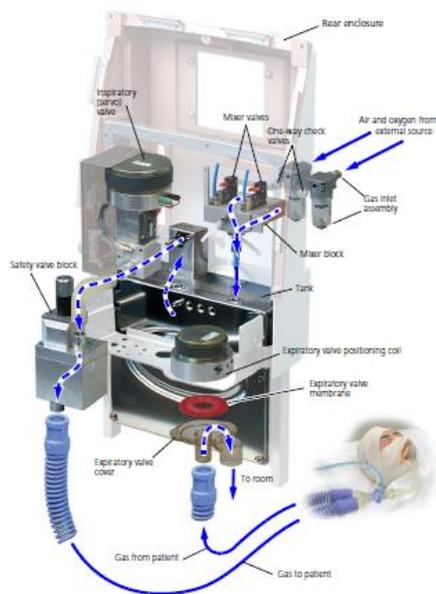
Nota: Tomado de Manual Galileo Hamilton Medical AG

Ingreso de aire y oxígeno comprimido (2) Salida de flujo de aire/ oxígeno mezclado hacia el paciente (3) Ingreso y escape de gases expirados por el paciente.

El ingreso (1) se a través de una válvulas check unidireccionales, las cuales permitirán el paso del flujo en un solo sentido impidiendo el retorno del flujo, hacia el mixer el cuál se encargará de mezclar los gases de entrada (aire y oxígeno), y almacenar la mezcla en el tanque, para posteriormente ser enviado por la servo válvula inspiratoria, a través del bloque de válvulas de seguridad hacia el paciente (2), los gases exhalados del paciente se dirigirán por un conducto hacia una válvula de expiración la cuál dirigirá estos gases hacia el ambiente. (Medical, 2005)

Figura 17

Despiece y secuencia de flujo principal del ventilador Hamilton Galileo.



Nota: Tomado de Manual Galileo Hamilton Medical AG

En el grupo que se conformó en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, uno de los objetivos fue reproducir este tipo de válvulas, donde los componentes electrónicos y la automatización del equipo formaron parte de la responsabilidad de la señorita Katherine Méndez egresada de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. En el presente trabajo nos centraremos en 2 válvulas de importancia para el funcionamiento del ventilador Hamilton Galileo, las cuales son:

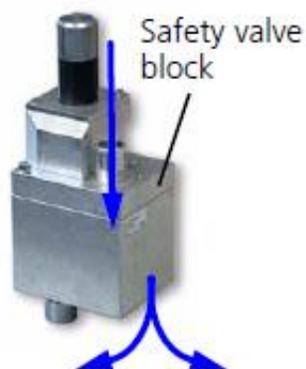
- **Bloque de Válvulas de Seguridad.**

Esta válvula evita que el circuito respiratorio del paciente, sea capaz de sobrepasar presiones de 100 mbar, en caso de una avería del respirador Galileo, se accionara una placa en la parte inferior del bloque, la cual liberara presión enviando una parte del flujo al exterior y permitiendo que la otra parte se dirija hacia el paciente, de igual manera impide que el paciente inhale aire ambiente. En caso de un mal funcionamiento en el

ventilador que impida el flujo de aire al paciente, se activará la válvula solenoide permitiendo el ingreso de aire ambiente hacia el paciente.

Figura 18

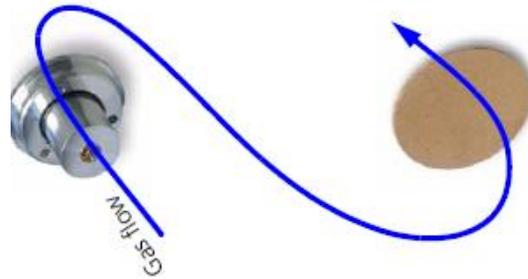
Bloque de Válvula de seguridad



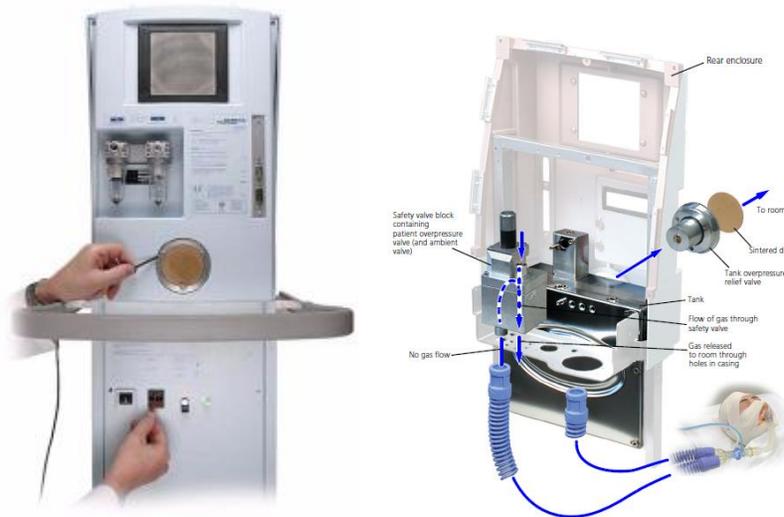
Nota: Tomado de Manual Galileo Hamilton Medical AG

- **Válvula de sobre presión.**

Esta válvula se conecta directamente con el tanque, en caso de mal funcionamiento del respirador Galileo, esta válvula se abre o cierra para garantizar la mezcla requerida de aire/oxígeno en el tanque gracias a la presión para su accionamiento, la cuál es de 320 mbar, en caso de accionarse el flujo transcurrirá por el interior de la válvula hacia el disco sinterizado ubicado en la parte posterior de la válvula, este mismo disminuye el ruido en el tanque de sobrepresión.

Figura 19*Válvula de sobre-presión*

Nota: Tomado de Manual Galileo Hamilton Medical AG

Figura 20*Respirador Galileo y Ubicación de Válvulas*

Nota: Tomado de Manual Galileo Hamilton Medical AG

CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA, ELEMENTOS PARA UN RESPIRADOR EMERGENTE Y VÁLVULAS PARA RESPIRADOR GALILEO

Inicialmente se realizó un estudio previo del manual del ventilador comercial Galileo PN 610207/05, Para comprender el funcionamiento de la válvula de seguridad y la válvula de sobre presión, con el fin de asignarle adecuadamente: material, espesor, ubicación, tamaño y forma a cada uno de sus componentes, se realizó un estudio previo del manual del ventilador comercial Galileo PN 610207/05,

De igual manera para el diseño y construcción del respirador emergente, se analizaron los diseños y resultados de respiradores emergentes presentados por el MIT, el funcionamiento y rangos de operación de los diversos componentes.

Respiradores Emergentes

Un respirador emergente debe ser capaz de funcionar por largos periodos de tiempo y de igual manera ser adaptable a los requerimientos del paciente, puesto que estos varían dependiendo del peso, estatura y edad. Por lo que existen parámetros a tomar en cuenta al momento del diseño, entre los más importantes tenemos:

- Respiraciones por Minuto (Frecuencia Respiratoria) entre 6 y 40.
- Volumen de corriente entre 200 y 800 ml, está se refiere al volumen de aire que es empujado al pulmón. Estos valores son calculados dependiendo del peso y altura del paciente como factores principales. El peso se calcula a través de fórmulas obtenidas por parte de ARDSnet como parte de su "Mechanical Ventilation Protocol" (MIT, 2020), considerado como un peso ideal. Mientras que posterior a esto con la tabla (ANEXO 1) obtenida por parte de los mismos, se obtendrá el volumen corriente adecuado para cada paciente.

Para calcular el peso ideal del paciente se utilizan las ecuaciones (2) para pacientes masculinos y (3) para pacientes femeninos, como se puede ver a continuación:

$$Peso(M) = 50 + [0,91(h - 152.4)] \quad (2)$$

$$Peso(F) = 45,5 + [0,91(h - 152.4)] \quad (3)$$

Donde:

Peso(M): Peso corporal ideal Masculino.

Peso (F): Peso corporal ideal Femenino.

h: altura en cm.

- Relación I/E (inspiración/ espiración) tomada en un rango de 1:1, 1:2, 1:4.
- Presión Inspiratoria Máxima (Presión hacia las vías respiratorias máxima) de 40cmH₂O.
- Presión Meseta (Presión de retención entre la inspiración y la espiración) el cuál debe limitarse a un máximo de 30cmH₂O.
- Se debe implementar una condición de falla, la cual permita la una anulación manual, en caso de fallo de la ventilación mecánica.

Lo señalado anteriormente se convertirá en un punto de partida para el diseño del ventilador emergente controlando variables como: velocidad de brazos de aplastamiento, velocidad de entrada del motor, sistema de transmisión, potencia del motor, selección de materiales, ubicación de componentes.

Brazos de Aplastamiento

Existen varios métodos de aplastamiento para una bolsa de aire para respiración manual (AMBU), entre las cuales encontramos: aplastamiento por brazos, aplastamiento por presión o por pistones. Para la selección del método más adecuado se procede a tomar en cuenta las recomendaciones por parte del MIT, para utilización de la bolsa de

aire, a fin de que la misma pueda tener un tiempo de vida útil como mínimo de 7 días y un uso de alrededor de 604,800 ciclos (MIT, 2020).

Recomendaciones:

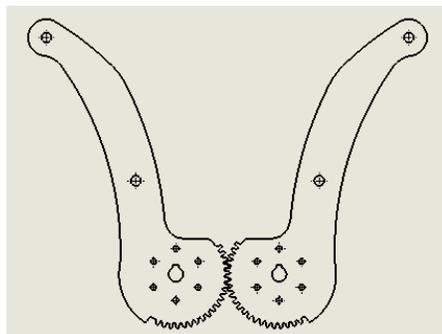
- Reducir fatiga en el material.
- Apoyo flexible de la bolsa de aire.
- Facilidad de movimiento de la bolsa durante la operación.
- Maximizar el área de contacto de aplastamiento.
- Superficies lisas de contacto.

Por lo cual se optó por el uso de brazos de aplastamiento debido a lo siguiente

- Regulación de la apertura y cierre, esto es gracias a los dientes ubicados en la parte inferior de los brazos, los cuales permiten la relación de transmisión entre ambos brazos, la forma cóncava entre ambos brazos garantiza una sujeción libre de la bolsa de aire (AMBU) permitiendo que la misma pueda ser colocada y retirada de manera inmediata.
- Los dedos ubicados en los costados de ambos brazos de aplastamiento, garantizarán una mayor área de contacto para el aplastamiento.

Figura 21

Esquema brazos de aplastamiento



Nota: Tomado de MIT Emergency Ventilator

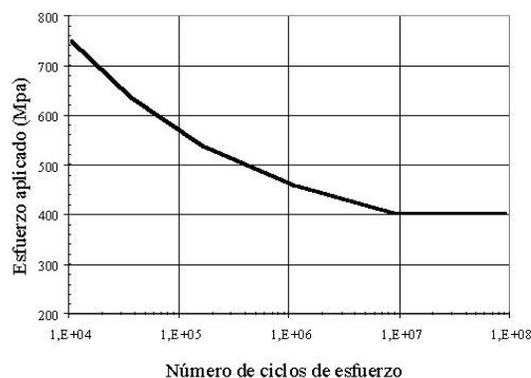
Tomando inicialmente una relación entre brazos de 1:1, estos mismos conservarán su relación de movimiento gracias a su parte inferior en forma de engranes rectos, cada uno con un módulo de 1,5 y referente a 48 dientes, debido a que los movimientos de los brazos no requieren el uso de un giro completo, se pueden obviar varios dientes del engrane.

El torque necesario para que la pinza realice el aplastamiento es de 10 Nm por cada brazo, resultando en un torque de 20 Nm requerido en la pinza para presionar la bolsa de aire (AMBU), lo que significaría un esfuerzo flector teórico de 320.5 MPa en los dientes del mismo y esperanza de vida útil de mínimo 500 millones de ciclos, con un factor de seguridad de 1,5 (Según datos de MIT Emergency Ventilator). Por lo que se requiere definir un material capaz de soportar este esfuerzo (MIT, 2020).

El acero AISI 304 es un acero inoxidable austenítico, tiene buena procesabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al calor, resistencia a bajas temperaturas. Relativamente de bajo costo y disponible en el mercado ecuatoriano. Por lo cual se seleccionó este acero como base para verificar el cumplimiento de su uso en la construcción de los brazos de aplastamiento.

Figura 22

Gráfica ciclos vs Esfuerzo flector Acero Inox 304



Nota: Tomado de upv.es/materiales

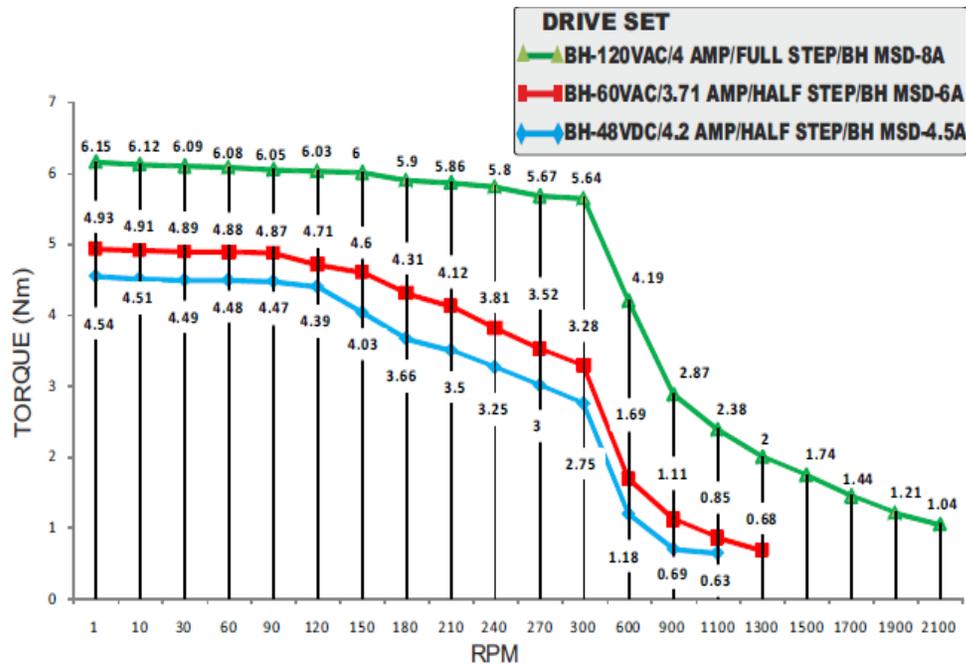
Como podemos observar en el Anexo 3 y Figura 22, el acero AISI 304 posee un esfuerzo máximo de 700 MPa, una esperanza de vida útil mayor a los 500 millones de ciclos, con un esfuerzo medio de alrededor de 350 MPa, por lo que podemos tomarlo como material seleccionado para los brazos de aplastamiento.

Sistema de transmisión

El principal componente es un sistema de transmisión el cual nos permita transferir la velocidad y potencia de un motor a pasos NENMA 34 (86bhh114-500a-35), el motor fue entregado por el CICTE para su uso en el ventilador emergente. A continuación, podemos observar el datasheet del motor NENMA 34.

Figura 23

Selección tipo de engranes Datasheet NEMA 34



Nota: Tomado de Bholanath

Como consideración inicial para el cálculo de nuestra relación de transmisión, se tomará en cuenta el rango de velocidades propuesto por ARDSNet, mencionado en

Clinical por parte del MIT para respiradores emergentes, el rango del mismo es de 6 a 40 respiraciones por minuto, lo que nos indica la velocidad a la que deben operar los brazos de aplastamiento (MIT, 2020).

Un motor Nema 34 es un motor a pasos con el cual, podemos controlar la velocidad de salida del mismo, el rango operativo para garantizar un aplastamiento del AMBU (Bolsa manual de aire), es de 1 a 300 RPM puesto que el torque suministrado al sistema será adecuado entre esas velocidades. Debido a esto surgen inicialmente ciertas consideraciones para la elección de un sistema de transmisión.

En primer lugar, se debe garantizar un trabajo continuo y sin interrupciones debido a que el equipo se mantendrá en uso constante. Es necesario la menor cantidad de componentes debido a que el equipo en conjunto debe ser fácil de transportar y de instalar, de igual manera se requiere minimizar el ruido producido por la transferencia de movimiento y torque. Entre los sistemas mayormente usados y de mayor presencia en el mercado ecuatoriano, tenemos a los sistemas de transmisión por uso de engranes, de los cuales destacan:

- Engranes Rectos.
- Engranes Helicoidales.
- Sin fin- Corona.

En la

Tabla 1 enlistaremos las características de cada tipo de engranes, para su posterior selección y utilización en el diseño.

Tabla 1*Selección tipo de engranes*

Requerimientos	Engranes Rectos	Sin Fin- Corona	Helicoidales
Poco espacio requerido		X	
Mecanismo Irreversible		X	
Poco peso		X	
Menor Costo de fabricación	X		X
Facilidad de Montaje	X	X	X
Mejor Transmisión de Torque		X	
Menor desgaste por impacto		X	
Menor desgaste por rozamiento	X		X

Como factores principales para la selección del tipo de engrane, se consideraron los mostrados en la

Tabla 1, por lo cual se determinó como mejor opción a utilizar el sistema de reducción tornillo sin fin corona.

Tomando en cuenta los valores de 6 a 40 respiraciones por minuto, esta velocidad es la requerida en los brazos de aplastamiento, con la cual se procede a calcular la relación de transmisión necesaria con los siguientes cálculos.

Debido a que según el datasheet obtenido de un NEMA 34, podremos obtener valores máximos de torque entre las 90 a 120 RPM para garantizar un uso adecuado del motor usaremos estos valores para determinar una relación de transmisión.

Para 6 respiraciones por minuto:

$$Vel = \frac{60}{6} = 10 \text{ bps} \quad (4)$$

Vel: Respiraciones por segundo (bps breaths per second)

Para el cálculo de la velocidad de giro de los brazos de aplastamiento N medida en [RPM], se requiere tener la velocidad de respiración Vel en [rad/s], por lo cual se realiza la correspondiente conversión teniendo así Vt :

$$Vt = 30 \times \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right)}{Vel} = 0,052 \frac{rad}{s} \quad (5)$$

Realizada la conversión podemos calcular la velocidad de giro:

$$N = \frac{Vt}{\pi} \times 60 = 1 \text{ RPM} \quad (6)$$

Para 40 respiraciones por minuto:

$$Vel = \frac{60}{40} = 1,5 \text{ bps} \quad (7)$$

Vel: Respiraciones por segundo (bps breaths per second)

$$Vt = 30 \times \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right)}{Vel} = 0,0349 \frac{rad}{s} \quad (8)$$

$$N = \frac{Vt}{\pi} \times 60 = 6,67 \text{ RPM} \quad (9)$$

N: Velocidad de giro en brazos de aplastamiento en RPM

Teniendo en cuenta las velocidades entre 90 y 120 RPM de salida del motor obtendremos relaciones de

$$Ie90 = \frac{90}{N} = 13,5 \quad (10)$$

$$Ie120 = \frac{120}{N} = 18 \quad (11)$$

Siendo:

Ie90: Relación de transmisión a 90 RPM en salida del motor a 6.67 RPM en los brazos de aplastamiento.

Ie120: Relación de transmisión a 120 RPM en salida del motor a 6.67 RPM en los brazos de aplastamiento.

Tomando en cuenta los resultantes de 13.5 a 18 se seleccionó una relación de transmisión equivalente a 15:1, donde cada 15 revoluciones del tornillo sin fin significarán 1 revolución de la corona.

Ya definida la relación de transmisión es posible realizar los cálculos para el diseño del conjunto sin fin corona.

Cálculo para el diseño del sistema de transmisión sin fin corona.

Para las consideraciones iniciales del diseño, se tomarán en cuenta características requeridas del motor NENMA 34, estas son una potencia de entrada de 34 W, un torque

de entrada de 20 Nm como se puede observar en la página 58 y una relación de transmisión de 15:1 seleccionada a partir de las ecuaciones (10) y (11).

Los siguientes valores son los datos de entrada requeridos para el cálculo y diseño de los demás parámetros:

n_e : Velocidad de entrada (motor) en revoluciones por minuto RPM"

$$n_e = 120 \text{ RPM} \quad (12)$$

P_e : Potencia de entrada (nominal) en Watts

$$P_e = 34 \text{ W} \quad (13)$$

T_1 : Torque de entrada Nm

$$T_1 = 1,385 \text{ Nm} \quad (14)$$

i : Relación de transmisión

i_t : Relación de transmisión total del conjunto reductor

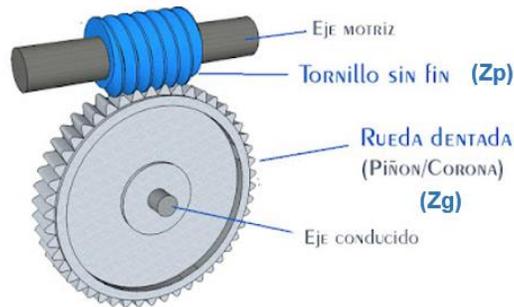
$$i = i_t = 15 \quad (15)$$

Geometría de los engranes

Los elementos básicos para determinar la geometría de un engrane son el módulo (m), el número de dientes del piñón que, en este caso al ser un tornillo sin fin se denomina número de entradas Z_p , el número de dientes del engrane conducido (corona) Z_g y el ángulo de presión ϕ .

Figura 24

Conjunto tornillo sin fin corona



Nota: Tomado de (Londin, 2018)

El módulo de los engranes se seleccionó de acuerdo a la relación de transmisión requerida de 15:1, debido a que el módulo afecta directamente al tamaño de la corona, es decir, mientras más grande sea el módulo también lo será el engrane, por esto se seleccionó el siguiente valor de módulo:

$$m = 2 \text{ mm} \quad (16)$$

El número de entradas del tornillo sin fin también afecta al tamaño de la corona ya que si tenemos más entradas mayor será el número de dientes de la corona, el valor seleccionado es:

$$Z_p = 1 \quad (17)$$

Para el número de dientes de la corona se utiliza la ecuación (18).

$$Z_g = Z_p \times it \quad (18)$$

$$Z_g = 1 \times 15$$

$$Z_g = 15$$

El número de dientes requeridos en la corona para cumplir con la relación de transmisión es de 15.

El ángulo de presión adecuado para evitar interferencia en el conjunto es:

$$\phi = 14,5^\circ \quad (19)$$

Geometría tornillo sin fin

El paso circular del engrane será igual al paso axial en el sin fin para que exista un correcto contacto entre sus dientes, representado en la Figura 25 como P. Además, sirve para el cálculo de los demás valores geométricos.

Paso axial

$$px = \pi \times m \quad (20)$$

$$px = \pi \times 2 = 6,283 \text{ mm}$$

Altura del diente

$$hp = 2,167 \times m \quad (21)$$

$$hp = 2,167 \times 2 = 4,334 \text{ mm}$$

El diámetro primitivo se establece comúnmente entre un rango de 8 a 12 veces el módulo, en este caso al requerir menor tamaño y peso se seleccionará un promedio de rango, es decir, 10 veces el módulo.

Diámetro primitivo del tonillo sin fin

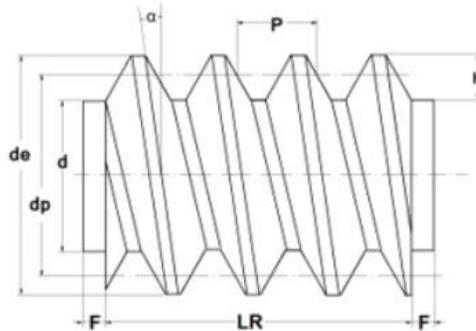
$$dp = 10 \times m \quad (22)$$

$$dp = 10 \times 2 = 20 \text{ mm}$$

En el esquema presentado en la Figura 25 se observa la longitud y configuración establecida para un tornillo sin fin, así como las partes que lo conforman.

Figura 25

Longitud establecida tornillo sin fin



Nota: Tomado de IMEC calculator

La longitud roscada LR es la parte útil del tornillo sin fin que estará en contacto con la corona y se calcula de la siguiente manera:

$$LR = px \times \left[45 + \left(\frac{Zg}{50} \right) \right] \quad (23)$$

$$LR = 6,283 \times \left[45 + \left(\frac{15}{50} \right) \right] = 30,159 \text{ mm}$$

La longitud total incluye extremos que no son roscados LR +2F.

$$LT = LR + 2 \times px \quad (24)$$

$$LT = 30,159 + 2 \times 6,283 = 42,726 \text{ mm}$$

El radio de cabeza r sirve para que los bordes de tengan un redondeo y no aristas.

$$r = 0,05 \times px \quad (25)$$

$$r = 0,05 \times 6,283 = 0,314 \text{ mm}$$

Para el acoplamiento se analiza la parte geométrica del diente, que está conformado por la cabeza a y la raíz b.

Cabeza a:

$$a = \frac{px}{\pi} \quad (26)$$

$$a = \frac{6,283}{\pi} = 2 \text{ mm}$$

Raíz b:

$$b = \frac{1,167 \times px}{\pi} \quad (27)$$

$$b = \frac{1,167 \times 6,283}{\pi} = 2,334 \text{ mm}$$

EL diámetro exterior dep del tornillo determina el diámetro mínimo del eje requerido para su manufactura, así como también el diámetro interior dip del mismo.

$$dep = dp + 2 \times a \quad (28)$$

$$dep = 20 + 2(2) = 24 \text{ mm}$$

Diámetro interior del tornillo

$$dip = dp - 2 \times b \quad (29)$$

$$dip = 20 - 2 \times 2,334 = 15,332 \text{ mm}$$

El espesor del diente determina la distancia entre los intervalos de contacto de un diente a otro.

$$ep = \frac{px}{2} \quad (30)$$

$$ep = \frac{6,283}{2} = 3,142 \text{ mm}$$

Geometría del engrane (Corona)

El diámetro primitivo dg de la corona es muy importante, ya que este es el punto donde se aplican las fuerzas de contacto, además es esencial para los cálculos posteriores.

$$dg = m \times Zg \quad (31)$$

$$dg = 30 \text{ mm}$$

A continuación, se calculan los mismos parámetros para la elaboración de un tornillo sin fin:

Altura del diente:

$$hg = 2,167 \times m \quad (32)$$

$$hg = 2,167 \times 2 = 4,334 \text{ mm}$$

Diámetro exterior de la corona:

$$deg = dg + 2 \times a \quad (33)$$

$$deg = 30 + 2(2) = 34 \text{ mm}$$

Diámetro interior de la corona:

$$dig = dg - 2 \times b \quad (34)$$

$$dig = 30 - 2 \times (2,334) = 25,332 \text{ mm}$$

La distancia entre centros C es necesaria para determinar los factores requeridos en el cálculo de fuerza tangencial, además es muy importante para el ensamble, ya que es con esta variable se diseñarán aspectos como concentricidad y ensamblaje de la estructura.

$$C = \frac{dp + dg}{2} \quad (35)$$

$$C = \frac{20 + 30}{2} = 25 \text{ mm}$$

Mediante la ecuación (15-48) del libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley octava Edición (Nisbett, 2008), se calcula el ancho de cara de la corona, la cuál es requerida para la longitud de maquinado de los dientes.

Figura 26

Ecuación ancho de cara

$$F_G = \begin{cases} 2d_m/3 & p_x > 0.16 \text{ pulg} \\ 1.125\sqrt{(d_0 + 2c)^2 - (d_0 - 4a)^2} & p_x \leq 0.16 \text{ pulg} \end{cases} \quad (15-48)$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Debido a que el paso axial px es menor a 0,16 in se utiliza la segunda ecuación de la Figura 26.

$$F = 1,125\sqrt{(deg + 2 \times c)^2 - (deg - 4 \times a)^2} \quad (36)$$

$$c = b - a = 0,334 \quad (37)$$

$$F = 1,125\sqrt{(30 + 2 \times 0,334)^2 - (30 - 4 \times 2)^2} = 25,798 \text{ mm}$$

El espesor del diente deberá ser similar al espesor del diente calculado en la ecuación (29) para garantizar el acople entre tornillo sin fin y corona.

$$eg = \frac{px}{2} \quad (38)$$

$$eg = \frac{6,283}{2} = 3,142 \text{ mm}$$

El diámetro mayor D sobre aristas y el radio excéntrico R se utilizan para la manufactura de la corona, siendo estos:

$$D = deg + 0,4775 \times px \quad (39)$$

$$D = 30 + 0,4775 \times 6,283 = 37 \text{ mm}$$

$$R = 0,5 \times dp - m \quad (40)$$

$$R = 0,5 \times 20 - 2 = 8 \text{ mm}$$

Cálculo de diámetro de la flecha para los brazos de aplastamiento

En el siguiente apartado se tomará en cuenta la geometría del sin fin y corona, velocidad de operación y cargas aplicadas, para determinar un diámetro adecuado de la flecha de transmisión para brazos de aplastamiento.

Eficiencia del tornillo sin fin

La eficiencia de un tornillo sin fin afecta directamente a la potencia requerida en el motor, debido a las pérdidas producidas principalmente por fricción en forma de calor.

Para el cálculo de la eficiencia es necesario calcular los parámetros a continuación:

Ángulo de avance:

$$\lambda = \left(\frac{Zp \times px}{\pi \times dp} \right) \quad (41)$$

$$\lambda = \left(\frac{1 \times 6,283 \text{ mm}}{\pi \times 20 \text{ mm}} \right) = 5,711^\circ$$

Para la velocidad tangencial ejercida:

$$Vt = \pi \times ne \times \frac{dp}{\cos \cos \lambda} \quad (42)$$

La velocidad tangencial para posteriores cálculos es necesaria en fpm (pies por minuto) por lo tanto se realiza la conversión:

$$Vt = \pi \times 120 \text{ rpm} \times \frac{20 \text{ mm}}{\cos \cos 5,71} \times \frac{1 \text{ ft}}{304,8 \text{ mm}} = 24,86 \text{ fpm} \quad (43)$$

AGMA proporciona el coeficiente de fricción f como:

Figura 27

Coeficiente de fricción para engranes según AGMA

$$f = \begin{cases} 0.15 & Vt = 0 \\ 0.124 \exp(-0.074V_t^{0.645}) & 0 < Vt \leq 10 \text{ fpm} \\ 0.103 \exp(-0.110V_t^{0.450}) + 0.012 & Vt > 10 \text{ fpm} \end{cases}$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Se utiliza la tercera ecuación debido a que la velocidad tangencial es mayor a 10 fpm:

$$f = 0,103e^{(-0,110 \times Vt^{0,450})} + 0,012 \quad (44)$$

$$f = 0,103e^{(-0,110 \times 24,86^{0,450})} + 0,012 = 0,077$$

La eficiencia está definida por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\cos \cos \phi - f \tan \tan \lambda}{\cos \cos \phi + f \cot \cot \lambda} \quad (45)$$

$$\eta = \frac{\cos \cos 14,5^\circ - 0,077 \tan \tan 5,71^\circ}{\cos \cos 14,5^\circ + 0,077 \cot \cot 5,71^\circ} \times 100 = 55 \%$$

Con el valor de la eficiencia podemos calcular la potencia de entrada real:

$$P_{e_r} = \frac{P_e}{\eta} \quad (46)$$

$$P_{e_r} = \frac{34 \text{ W}}{0,55} = 61,82 \text{ W}$$

Esta es la potencia requerida en el motor debido a las pérdidas en el mecanismo tornillo sin fin corona ocasionadas por la fricción.

Fuerzas en la corona

En la corona se presentan tres tipos de fuerzas (tangencial, radial, axial), las mismas que son necesarias para calcular los esfuerzos que deberá soportar la flecha y así determinar su diámetro.

Primero se calcula el valor de la fuerza tangencial, que depende de la velocidad de salida del reductor y del torque de salida:

Velocidad de salida en el reductor:

$$n_s = \frac{n_e}{i_t} \quad (47)$$

$$n_s = \frac{120 \text{ rpm}}{15} = 8 \text{ rpm}$$

Torque de salida:

$$T_2 = \frac{T_1 \times n_e}{n_s} \quad (48)$$

$$T_2 = \frac{1,385 \text{ Nm} \times 120 \text{ rpm}}{8 \text{ rpm}} = 20,775 \text{ Nm}$$

Para determinar la fuerza tangencial se encuentra los parámetros especificados a continuación:

$$W_{tg} = C_s \times C_m \times C_v \times d_g^{0,8} \times F \quad (49)$$

Donde:

Cs = factor de materiales.

Cm = factor de corrección de relación.

Cv = factor de velocidad.

dg= diámetro medio de la rueda en pulgadas.

F = ancho de la corona en pulgadas.

Factor de materiales

Se utiliza la siguiente ecuación debido a que la distancia entre centros C es 25 mm (0,98 in).

$$C_s = 270 + 10,37C^3 \quad (50)$$

$$C_s = 270 + 10,37 \times 0,98^3 = 279,76$$

Factor de corrección de relación

Este factor depende de la relación de transmisión del reductor y se calcula de acuerdo a una de las ecuaciones de la

Figura 28.

Figura 28*Factor de corrección*

$$C_m \begin{cases} 0.02 \sqrt{-m_G^2 + 40m_G - 76 + 0.46} & 3 < m_G \leq 20 \\ 0.02 \sqrt{-m_G^2 + 56m_G + 5\,145} & 20 < m_G \leq 76 \\ 1.1483 - 0.00658 m_G & m_G > 76 \end{cases}$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Donde m_g es la relación de transmisión, en nuestro caso $m_g = i = 15$ y se utiliza la primera ecuación:

$$C_m = 0,02 \sqrt{-m_g^2 + 40m_g - 76 + 0,46} \quad (51)$$

$$C_m = 0,02 \sqrt{-15^2 + 40 \times 15 - 76 + 0,46} = 0,346$$

Factor de velocidad

Este factor depende de la velocidad tangencial calculada previamente en la ecuación (43).

Figura 29*Factor de velocidad*

$$C_v \begin{cases} 0.6859 e^{(-0.0011V_t)} & V_t < 700 \text{ fpm} \\ 13.31 V_t^{-0.571} & 700 \leq V_t < 3\,000 \text{ fpm} \\ 65.52 V_t^{-0.774} & V_t > 3\,000 \text{ fpm} \end{cases}$$

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley ecuación (15-37)

Ya que la velocidad es menor a 700 fpm utilizamos la primera ecuación:

$$C_v = 0,6859 e^{-0,001V_t} \quad (52)$$

$$Cv = 0,6859e^{-0,001 \times 24,86} = 0,669$$

Obtenidos todos los valores se calcula la fuerza tangencial en la corona usando la ecuación (49):

$$Wtg = 279,76 \times 0,346 \times 0,669 \times 1,18^{0,8} \times 1,02 \quad (53)$$

$$Wtg = 75,40 \text{ lbf} \approx 335,38 \text{ N}$$

Para la fuerza radial en la corona se utiliza la siguiente ecuación que depende de la fuerza tangencial:

$$Wrg = \frac{Wtg\phi}{\cos \lambda} \quad (54)$$

$$Wrg = \frac{335,38 \times 14,5}{\cos 5,71} = 87,17 \text{ N}$$

La fuerza axial en la corona se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Wag = \frac{2T1}{dp} \quad (55)$$

El diámetro dp debe estar en metros:

$$Wag = \frac{2 \times 1,385}{\frac{20}{1000}} = 138,5 \text{ N}$$

Fuerzas en el tornillo sin fin

En el tornillo sin fin se presentan las mismas fuerzas que la corona, pero sus valores están intercambiados debido a la configuración de ejes perpendiculares. En la Figura 8 se puede ver cómo están relacionadas estas fuerzas.

La fuerza tangencial en el tornillo sin fin Wtw es numéricamente igual a la fuerza axial en la corona calculada en la ecuación (55).

$$Wtw = Wag = 138,5 \text{ N} \quad (56)$$

La fuerza axial en el tornillo sin fin Waw es numéricamente igual a la fuerza tangencial en la corona, calculada en la ecuación (53):

$$W_{aw} = W_{tg} = 335,38 \text{ N} \quad (57)$$

Las fuerzas radiales son iguales numéricamente entre el tornillo sin fin y la corona calculada en la ecuación (54):

$$W_{rw} = W_{rg} = 87,17 \text{ N} \quad (58)$$

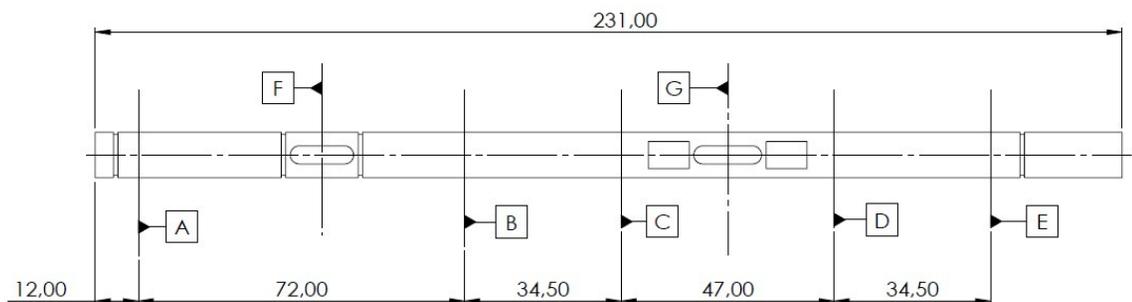
Diseño de flecha

La Figura 30 representa la flecha en la cual están ensamblados el brazo derecho y la corona, es decir, esta flecha soporta la mayoría de los esfuerzos.

Para el análisis para el cálculo del diámetro se realizará en base a esta flecha y no a la del brazo izquierdo.

Figura 30

Esquema flecha del brazo derecho y corona



Los puntos A B C D E son los apoyos en los cuales se ubican los rodamientos, en el punto F se ubica el brazo derecho el cual ejerce un torque en la flecha, y en el punto G se encuentra la corona que también ejerce un torque en la flecha debido a la fuerza tangencial.

Diagramas de los esfuerzos cortantes y momentos torsores en el plano xy

En este plano tenemos la fuerza tangencial de la corona W_{tg} , que la multiplicamos por el radio de la corona para así obtener el momento en el eje que está aplicado en el punto G:

$$M_{Wtg} = Wtg \times \frac{dg}{2} \quad (59)$$

$$M_{Wtg} = 335,38 \times \frac{0,03}{2} = 5,03 \text{ Nm}$$

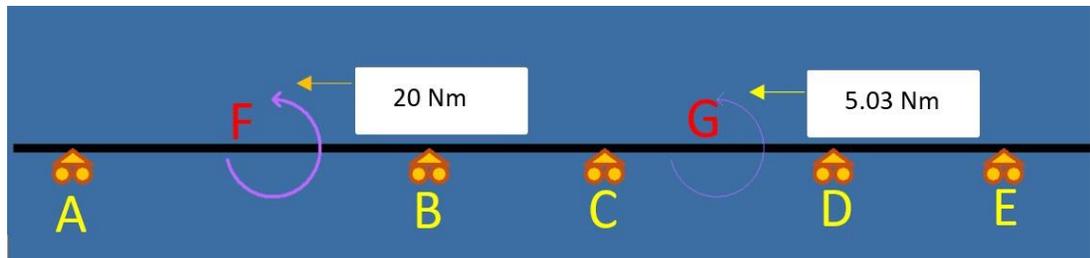
Adicional en este plano, se tiene también el torque ejercido por el brazo derecho aplicado en el punto F, que tiene un valor de:

$$M_{bd} = 20 \text{ Nm} \quad (60)$$

Con los dos torques se realiza el análisis en el plano xy Figura 31 y con el programa XVIGAS v0.02f se obtienen los valores de los momentos para definir la sección peligrosa, donde es más probable que ocurra el fallo.

Figura 31

Esquema de momentos por torsión aplicados en flecha

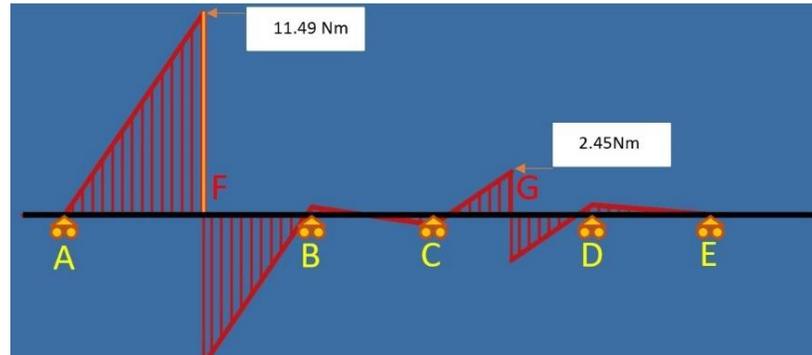


Nota: Tomado de Programa Xvigas

Momentos torsores

En la

Figura **32** se observan los momentos resultantes generados en la fecha, en el punto F correspondiente al brazo derecho se presenta el mayor momento con un valor de 11,49 Nm, mientras que en el punto G que corresponde a la corona, se tiene un menor momento torsor de 2,45 Nm.

Figura 32*Momentos torsores resultantes*

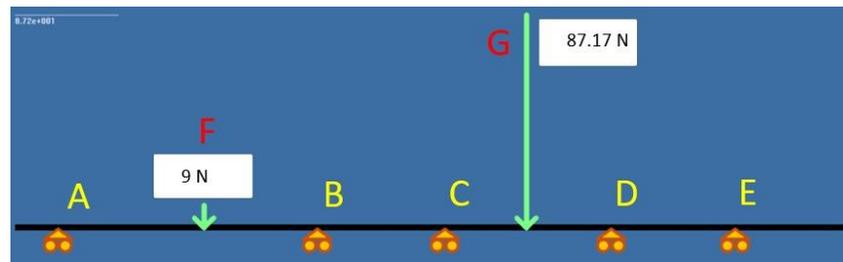
Nota: Tomado de Programa Xvigas

Diagrama de esfuerzos cortantes y momentos flectores en el plano xz

En el plano xz actúa la fuerza radial W_{rg} de 85,17 N ejercida en la corona, adicional se tiene el peso aproximado del brazo derecho con sus dedos acoplados, el mismo se obtuvo al pesar los brazos en una balanza. Al multiplicar este valor por la gravedad se obtiene una fuerza de:

$$W_{bd} = 9 \text{ N} \quad (61)$$

Con las dos fuerzas se realiza el análisis en el plano xz Figura 33 y con el programa XVIGAS v0.02f se obtienen los valores de momentos para definir la sección peligrosa.

Figura 33*Esquema de cargas puntuales aplicadas en flecha*

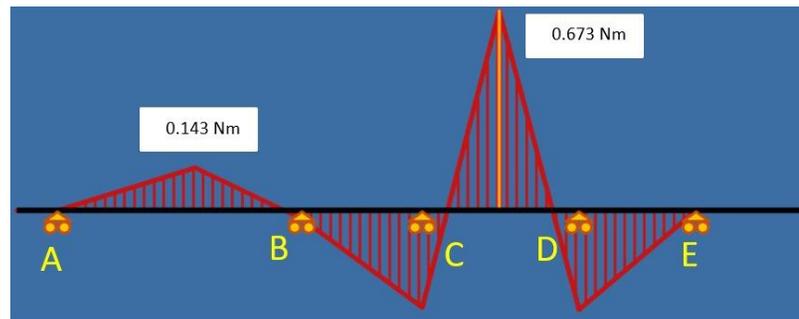
Nota: Tomado de Programa Xvigas

Momentos flectores

En la Figura 34 se presentan los momentos resultantes en el eje, en el punto G correspondiente a la corona se presenta el mayor momento con un valor de 0,673 Nm, mientras que en el punto F que corresponde al brazo derecho se tiene un menor momento flector de 0,143 Nm.

Figura 34

Momentos flectores resultantes



Nota: Tomada del Programa Xvigas

Determinación de sección crítica

En base a los resultados anteriores se definen los momentos torsores y flectores en cada punto:

Punto F

Momento torsor máximo:

$$MT_F = 11,49 \text{ Nm} \quad (62)$$

Momento flector máximo

$$MF_F = 0,14 \text{ Nm} \quad (63)$$

Punto G

Momento torsor máximo:

$$MT_G = 2,45 \text{ Nm} \quad (64)$$

Momento flector máximo

$$MF_G = 0,67 \text{ Nm} \quad (65)$$

Con los valores de los momentos máximos en los dos puntos, tenemos que el momento torsor generado por el brazo derecho (punto F) es de $MT_F=11,49 \text{ Nm}$, y el momento flector es $MF_F=0,14 \text{ Nm}$. Mientras que el momento torsor en la corona (punto G) es $MT_G=2,45 \text{ Nm}$ y el momento flector es $MF_G=0,67 \text{ Nm}$. Por lo tanto, el cálculo del diámetro de la flecha se realizará con los valores en el punto F ya que es donde se encuentra la sección más crítica.

Análisis en el punto crítico F

Para el análisis primero se requiere calcular los esfuerzos de torsión y flexión, para todas las ecuaciones siguientes de esfuerzos flectores, torsores, alternantes y medios deben ser divididos para d^3 .

Esfuerzo flector:

$$\sigma = \frac{32MF_F}{\pi d^3} \quad (66)$$

$$\sigma = \frac{32 \times 0,14}{\pi d^3} = \frac{1,43}{d^3} \text{ MPa}$$

Esfuerzo torsor:

$$\tau = \frac{16MT_F}{\pi d^3} \quad (67)$$

$$\tau = \frac{16 \times 11,49}{\pi d^3} = \frac{58,52}{d^3} \text{ MPa}$$

Resistencia a la fatiga del material

El material utilizado es un acero k110 con su equivalencia AISI D2, el cual tiene las siguientes propiedades mecánicas:

$$S_{ut} = 1400 \text{ MPa} \quad (68)$$

$$S_y = 1300 \text{ MPa} \quad (69)$$

Para el cálculo de la resistencia a la fatiga del material, es necesario primero determinar los factores de concentración de esfuerzos dependientes del tipo de fijación utilizado, estos valores se toman de la Tabla 7-1 del libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Anexo 3.

Para nuestro caso se utilizaron cuñeros fresados por lo cual los factores son:

Factor de flexión

$$K_{tb} = 2,2 \quad (70)$$

Factor de torsión

$$K_{ts} = 3 \quad (71)$$

Factor de superficie

El factor de superficie se puede calcular mediante la ecuación 6-19 del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, el cual depende de la resistencia S_{ut} del material y de los factores a y b que se obtienen de la tabla 6-2 Anexo 3.

$$K_a = aS_{ut}^b \quad (72)$$

$$a = 4,51$$

$$b = -0,265$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (72) se tiene:

$$K_a = 4,51 \times 1400^{-0,265} = 0,66 \quad (73)$$

Factor de tamaño

Este factor depende del diámetro de la flecha, pero al desconocer este valor, se puede asumir un factor de tamaño medio de:

$$K_b = 0,9 \quad (74)$$

Factor de carga

El factor se obtiene de la ecuación 6-26 del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley y debido a que el sistema principalmente trabajará a torsión se selecciona este factor.

$$K_C = 0,59 \quad (75)$$

Resistencia a la fatiga

Este límite depende de la resistencia del material, en este caso debido a que la resistencia a la tensión del acero k110 es 1400 MPa. Usaremos la primera ecuación mostrada en la página 45 y se estima mediante:

$$S'_e = 0,5S_{ut} \quad (76)$$

$$S'_e = 0,5 \times 1400 = 700 \text{ MPa}$$

Con los valores de los factores y la resistencia de la flecha reemplazamos todos los valores en la siguiente ecuación:

$$S_e = K_a K_b K_c S'_e \quad (77)$$

$$S_e = 0,66 \times 0,9 \times 0,59 \times 700 = 245,32 \text{ MPa}$$

Este es el valor de la resistencia a la fatiga del material.

Esfuerzos medios y alternantes

Estos esfuerzos son necesarios para posteriormente calcular los esfuerzos equivalentes requeridos en la teoría de falla, la cual nos permite determinar el diámetro de la flecha.

Primero se debe establecer los esfuerzos máximos y mínimos correspondientes a los esfuerzos por torsión y flexión.

Esfuerzo máximo por flexión:

$$\sigma_{max} = \sigma = \frac{1,43}{d^3} \text{ MPa} \quad (78)$$

Esfuerzo mínimo por flexión:

$$\sigma_{min} = -\sigma = -\frac{1,43}{d^3} MPa \quad (79)$$

Esfuerzo máximo por torsión:

$$\tau_{max} = \tau \quad (80)$$

$$\tau_{max} = \frac{58,52}{d^3} MPa$$

Esfuerzo mínimo por torsión:

$$\tau_{min} = \tau = \frac{58,52}{d^3} MPa \quad (81)$$

Con estos valores podemos calcular los esfuerzos medios y alternantes por flexión

Esfuerzo medio:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (82)$$

$$\sigma_m = \frac{1,43 + (-1,43)}{2d^3} = 0$$

Esfuerzo alternante:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2d^3} \quad (83)$$

$$\sigma_a = \frac{1,43 - (-1,43)}{2d^3} = \frac{1,43}{d^3} MPa$$

Se multiplican estos valores por el factor de concentración de esfuerzos por flexión:

$$\sigma_{m\chi} = \sigma_m K_{tb} \quad (84)$$

$$\sigma_{m\chi} = 0 \times 2,2 = 0$$

$$\sigma_{a\chi} = \sigma_a K_{tb} \quad (85)$$

$$\sigma_{a\chi} = \frac{1,43}{d^3} \times 2,2 = \frac{3,15}{d^3} MPa$$

Ahora calculamos los esfuerzos medios y alternantes por torsión

Esfuerzo medio:

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2d^3} \quad (86)$$

$$\tau_m = \frac{58,52 + 58,52}{2d^3} = \frac{58,52}{d^3} MPa$$

Esfuerzo alternante:

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2d^3} \quad (87)$$

$$\tau_a = \frac{58,52 - 58,52}{2d^3} = 0$$

Se multiplican estos valores por el factor de concentración de esfuerzos por torsión

$$\tau_{m\chi} = \tau_m K_{ts} \quad (88)$$

$$\tau_{m\chi} = \frac{58,52}{d^3} \times 3 = \frac{175,56}{d^3} MPa$$

$$\tau_{a\chi} = \tau_a K_{ts} \quad (89)$$

$$\tau_{a\chi} = 0 \times 3 = 0$$

Criterio de falla de Goodman Modificado

El criterio de falla que se aplicará es el de Goodman Modificado como se ve en la Figura 15, es una recta que se encuentra en un punto medio entre los criterios más optimistas y conservadores, su ecuación es la siguiente:

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma eq_a}{S_e} + \frac{\sigma eq_m}{S_{ut}} \quad (90)$$

Para el cálculo se requieren los esfuerzos equivalentes alternantes y medios.

$$\sigma eq_a = \sqrt{\sigma_{a\chi}^2 + 4\tau_{a\chi}^2} \quad (91)$$

$$\sigma eq_a = \sqrt{\left(\frac{3,15}{d^3}\right)^2 + 4 \times 0^2} = \frac{3,15}{d^3} MPa$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_{m\chi}^2 + 4\tau_{m\chi}^2} \quad (92)$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{0^2 + 4 \times \left(\frac{175,56}{d^3}\right)^2} = \frac{351,12}{d^3} \text{ MPa}$$

Consideramos un factor de seguridad de 2, el mismo nos servirá como un factor de incremento para la geometría de la flecha y reducir riesgos de falla.

$$FS = 2 \quad (93)$$

Aplicando el criterio de Goodman Modificado y despejando el valor del diámetro de la ecuación (90) tenemos:

$$d = \sqrt[3]{\frac{FS\{\sigma_{eqm}(S_e \times 10^6) + \sigma_{eqa}(S_{ut} \times 10^6)\}}{(S_e \times 10^6)(S_{ut} \times 10^6)}} \quad (94)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{2\{351,12(245,32 \times 10^6) + 3,15(1400 \times 10^6)\}}{(245,32 \times 10^6)(1400 \times 10^6)}} = 0,00807 \text{ m}$$

$$d = 8,07 \text{ mm}$$

Con el propósito de facilitar la elaboración de la flecha y demás componentes, se tomará un diámetro de 10 mm para la flecha del brazo derecho y del izquierdo.

Cálculo de materiales tornillo sin fin – corona

Entre los requerimientos que implica la fabricación de un engrane corona, están:

- Material blando en relación al tornillo sin fin.
- Amoldarse y funcionar en condiciones de alto deslizamiento.

Como recomendación de Shigley (Nisbett, 2008) en el apartado 15-8, podemos encontrar una configuración en base a aleaciones de acero con superficies endurecidas en conjunto con un material no ferroso. Por lo que la selección del material fue de un acero AISI8620 cementado para el tornillo sin fin, en conjunto con un bronce SAE40 para la corona.

AISI8620: Es un acero que presenta una excelente maquinabilidad y es ideal para el endurecido por tratamiento termino, altamente usado para sistemas de transmisión y disponible en el mercado ecuatoriano.

SAE40: Bronce fosforado de bajo costo, comúnmente usado en aplicaciones de engranes y coronas, soporta grandes cargas por lo que se espera eficiencia en trabajo a bajas y altas revoluciones.

Análisis por esfuerzo de flexión

Para el cálculo de los esfuerzos presentes nos basaremos en la ecuación 15-58 para una fuerza tangencial del libro de Shigley. Debido a que los dientes del tornillo sin fin tiende a ser más fuertes que los de la corona, no serán tomados en cuenta en el cálculo según (Nisbett, 2008), por lo que para estos casos se usa la ecuación de Buckingham para el cálculo de esfuerzo por flexión en un diente del engrane corona.

$$\sigma_a = \frac{W_{tg}}{p_n * F_e * y} \quad (95)$$

Donde:

Wtg: Fuerza tangencial en el engrane.

Pn: Paso circular normal.

Fe: Ancho de la cara.

y: Factor de Lewis.

Figura 35

Factor de Lewis

donde $p_n = p_x \cos \lambda$, y además y es el factor de forma de Lewis relacionado con el paso circular. Para $\phi_n = 14.5^\circ$, $y = 0.100$; $\phi_n = 20^\circ$, $y = 0.125$; $\phi_n = 25^\circ$, $y = 0.150$; $\phi_n = 30^\circ$, $y = 0.175$.

Nota: Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley capítulo 15

Reemplazando estos valores tenemos el esfuerzo por flexión:

$$\sigma_a = \frac{335,38}{6,283 * 25,798 * 0,1} = 20,69 \text{ Mpa} \quad (96)$$

Tomando en cuenta un Wt como carga de desgaste por Buckingham como:

$$Wt = Kw \times dg \times Fe \quad (97)$$

Donde:

Kw : Factor de carga de la corona.

dg : Diámetro de paso.

Fe : Ancho de cara de la corona.

Aplicando la ecuación (97) con un factor de carga Kw igual a 60 por tratarse de un acero endurecido en conjunto con bronce fosforado Anexo 3, tenemos:

$$Wt = 60 \times \frac{30}{25,4} \times \frac{25,798}{25,4} = 71,98 \text{ lbf} = 320,14N \quad (98)$$

$$\sigma_a = \frac{320,14}{6,283 * 25,798 * 0,1} = 19,75 \text{ Mpa} \quad (99)$$

Tomando en cuenta el límite de fluencia del Bronce fosforado SAE40 en 117 MPa podemos concluir que el material escogido es indicado para la aplicación.

Diseño de chavetas

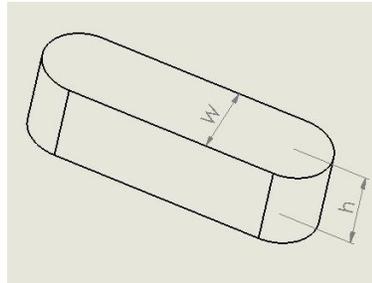
Para determinar las dimensiones de las chavetas se hará uso de la Tabla 7-6 del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, en la cual se sugieren las dimensiones de la chaveta y el chavetero de acuerdo al diámetro de la flecha en la que serán ensamblados.

Para nuestro caso el diámetro de la flecha es de 10 mm, por lo que se sugiere un chaveta cuadrada de 3/32 in o 2,4 mm, pero debido a que la maquinaria disponible no nos permite manufacturarlas con esas dimensiones, debido a la falta de precisión de las

mismas, se optó por fabricarlas de 4 mm, ya que es la mínima dimensión de barras cuadradas de la cual tenemos disponibilidad.

Figura 36

Dimensiones de la chaveta



$$w = h = 4 \text{ mm} \quad (100)$$

Selección del material

El material de la chaveta debe ser de menor resistencia que los otros elementos, esto debido a que es preferible que falle este elemento en lugar de que lo haga la flecha, el brazo o la corona, ya que estos elementos son más complejos y costoso de elaborar.

El material de la chaveta seleccionado es un acero AISI 1045 que cuenta con las siguientes propiedades mecánicas:

$$S_{y_{ch}} = 530 \text{ MPa} \quad (101)$$

$$S_{ut_{ch}} = 625 \text{ MPa} \quad (102)$$

Además, se considerará un factor de seguridad $FS_{cha}=2$.

Longitud de la chaveta

Las chavetas tienden a fallar por aplastamiento, por eso este será el criterio de análisis para determinar la longitud de la misma.

El esfuerzo de aplastamiento está definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{aplas} = \frac{F_2}{A_{Ptoy}} \quad (103)$$

Donde:

F_2 es la fuerza de aplastamiento producida por el torque $T_2=20$ Nm.

A es el área proyectada de la chaveta.

$$A_{ptoy} = \frac{h}{2}L \quad (104)$$

Donde L es la longitud de la chaveta.

$$F_2 = \frac{T_2}{\frac{d}{2}} \quad (105)$$

d es el diámetro de la flecha en m.

$$F_2 = \frac{20}{\frac{0,01}{2}} = 4000 \text{ N} \quad (106)$$

El esfuerzo de aplastamiento lo comparamos con la resistencia de la chaveta para determinar su longitud:

$$\sigma_{aplas} = \frac{Sy_{cha}}{FS_{ch}} \quad (107)$$

Igualando las ecuaciones (103) y (107) además reemplazamos la ecuación (104) tenemos:

$$\frac{F_2}{\frac{h}{2}L} = \frac{Sy_{cha}}{FS_{ch}} \quad (108)$$

Despejamos la longitud L y reemplazamos todos los datos:

$$L = \frac{F_2 FS_{ch}}{\frac{h}{2} Sy_{cha}} \quad (109)$$

$$L = \frac{4000 \times 2}{\frac{0,004}{2} \times (530 \times 10^6)} = 7,55 \text{ mm}$$

La longitud mínima es de 7,55 mm, pero decidimos tomar una longitud de 14 mm para las chavetas de los brazos y de 15 mm para la chaveta de la corona, esto para una

mayor facilidad de construcción, además es recomendable que la longitud no exceda 1,5 veces el diámetro de la flecha para evitar torceduras, es decir, no debe exceder los 15 mm y como vemos estamos dentro de ese límite (Nisbett, 2008).

Selección de rodamientos

Para la selección de los rodamientos que en este caso serán de bolas de una hilera, se calcula una carga estática equivalente en base a las fuerzas radial y axial aplicada en estos elementos.

Rodamiento del eje de la corona

Los rodamientos al ser de bolas, tienen los coeficientes X_o y Y_o los cuales son 0,6 y 0,5 respectivamente de acuerdo al catálogo de los mismos, además las fuerzas radial y axial se encuentran en las ecuaciones (54) y (55), reemplazando estos valores en la ecuación (1) tenemos:

$$P_o = 0,6 \times 87,17 + 0,5 \times 138,5 \quad (110)$$

$$P_o = 121,55 \text{ N}$$

Con este valor vamos al catálogo de rodamientos Koyo Anexo 3 y buscamos un rodamiento que soporte esta carga.

El rodamiento seleccionado es uno de 10x26x8 mm principalmente por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo, además que este rodamiento soporta una carga estática de 1950 N.

Rodamiento del tornillo sin fin

Para el tornillo sin fin se realiza el mismo cálculo, pero las fuerzas radial y axial se encuentran en las ecuaciones (58) y (57), reemplazando estos valores en la ecuación (1) tenemos:

$$P_o = 0,6 \times 87,17 + 0,5 \times 335,38 = 220 \text{ N} \quad (111)$$

De igual manera con este valor vamos a el catálogo Anexo 3 para seleccionar el rodamiento.

El rodamiento seleccionado es uno de 15x32x9 mm que este rodamiento soporta una carga estática de 2850 N.

Estructura del respirador mecánico

Para el diseño de la estructura nos basamos en la carga a soportar por parte de los apoyos en el eje de transmisión y la fuerza ejercida por el motor como torque estacionario, que será un momento torsor de máximo 2 Nm, mientras que en los apoyos presentados en la Figura 7 se calcularon las siguientes reacciones usando el software Xvigas.

Tabla 2

Cargas en apoyos

APOYOS	Ubicación (mm)	REACCIONES (N)
A	(12)	283,8
B	(84)	312,084
C	(119,5)	161,92
D	(165,5)	149,97
E	(200)	16.3345

Para poder determinar el esfuerzo aplicado en cada apoyo tomaremos como punto de partida el diseño de las paredes para la estructura del ventilador emergente. Para el diseño se tomaron inicialmente consideraciones geométricas las cuales fueron:

- Holgura y posicionamiento en ubicación del motor.
- Separación de la distancia entre centros de los brazos de aplastamiento.

- Espacio para implementos electrónicos.
- Dimensionamiento para acople de rodamientos y posicionamiento de sistema de transmisión.
- Espacio para montaje y desmontaje del equipo.

En la Figura 30 se encuentra detallado el esquema de los apoyos A, B, C, D, E sobre los cuales se encontrarán las cargas producidas por el eje de transmisión.

Figura 37

Esquema apoyos C, D

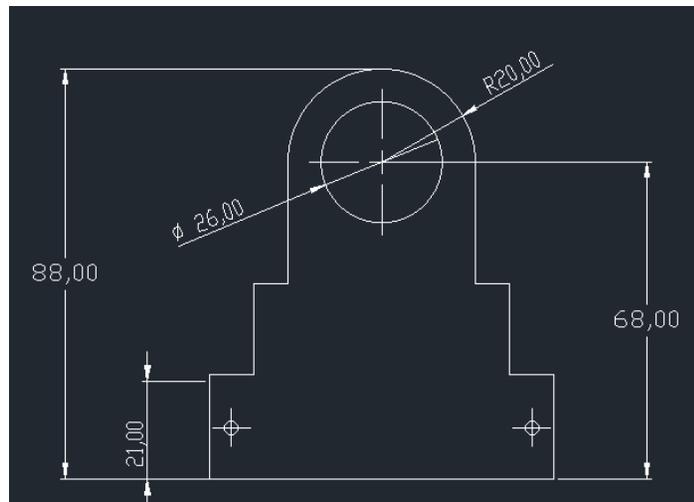
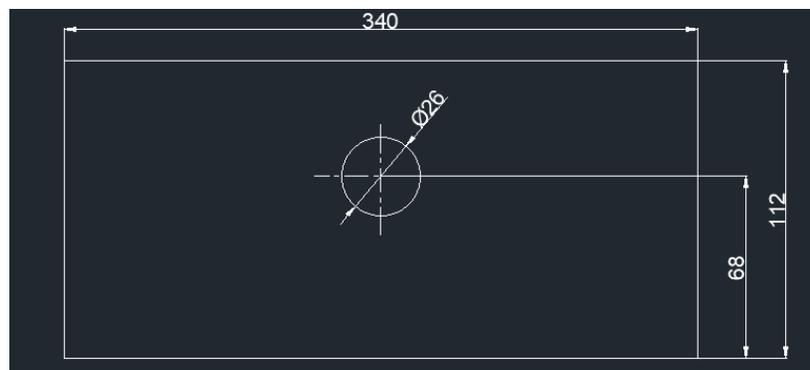


Figura 38

Esquema Apoyos A, B, E



Para la comprobación de material definiremos la carga aplicada en los apoyos y la compararemos con la resistencia del material a seleccionar.

Conforme nos indica la ecuación (112) tomada del libro Resistencia de Materiales Aplicada (Mayori, 2002) para comprobar esfuerzos por aplastamiento en las placas que servirán de apoyo.

$$S = \frac{F}{A} \quad (112)$$

Donde:

S = Esfuerzo resultante MPa

F = Carga Aplicada en los apoyos

A = Área de contacto

$$A = t * d \quad (113)$$

Donde:

t = Espesor de las placas

d = Diámetro.

$$A = 8 * 26 = 208 \text{ mm}^2 \quad (114)$$

El espesor de las placas será considerado de 8 mm = 0,008 m en base al espesor de los rodamientos el cual nos servirá de base para un espesor inicial.

Para los apoyos C y D usaremos una reacción máxima de 161,92 N y para los apoyos A, B y E usaremos una reacción máxima de 312,08 N obtenida previamente con el software Xvigas representadas en la Tabla 2.

Calculamos los esfuerzos resultantes:

$$S_{C,D} = \frac{161,92}{208} = 0,778 \text{ MPa} \quad (115)$$

$$S_{A,B,E} = \frac{312,08}{208} = 1,523 \text{ MPa} \quad (116)$$

El material seleccionado para la estructura en general del ventilador emergente, fue acrílico de 9 mm de acuerdo a los siguientes criterios:

- Bajo costo.
- Variedad de espesores.
- Maquinabilidad por corte laser.
- Buena resistencia a la tracción.
- Bajo peso.
- Facilidad de acceso y obtención.

Debido a que la resistencia del material a la tracción es de $S_y = 56,2$ MPa podemos determinar que el material es adecuado para el trabajo requerido.

En el caso de los apoyos C, D se decidió trabajar con un material metálico, puesto que se requirió una mayor estabilidad debido al movimiento y rotación aplicada por parte del motor. El material seleccionado es un Acero ASTM 36 recubierto con una capa de pintura anticorrosiva debido a los siguientes criterios:

- Bajo costo.
- Fácil maquinabilidad por corte laser.
- Disponible en variedad de espesores.

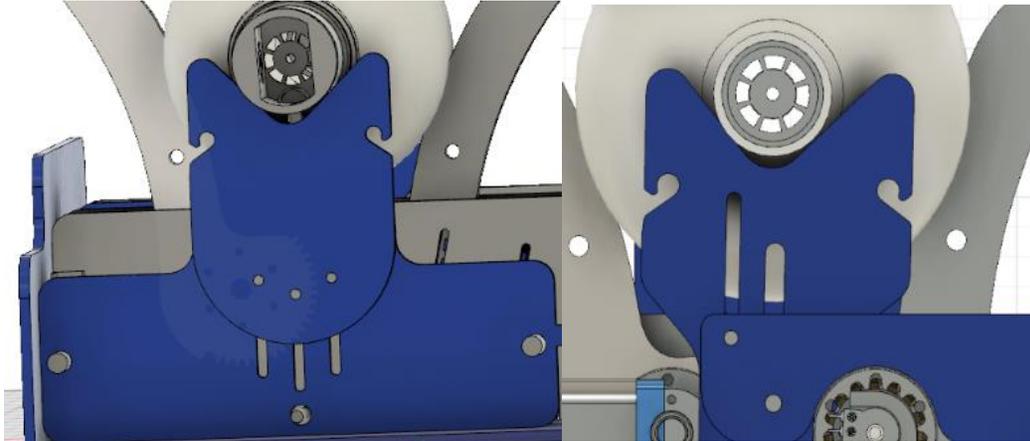
Consideraciones para el diseño de la estructura

Para el diseño de la estructura se tomaron en cuenta dimensiones y posiciones de operación de los distintos sistemas, así como piezas de ensamblaje. Entre los criterios se encuentran:

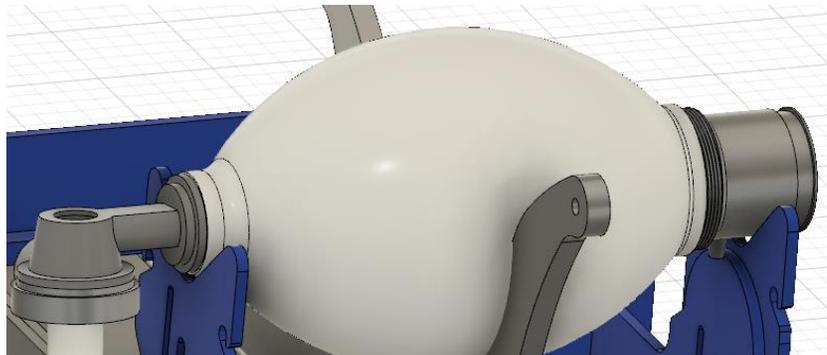
Soportes para AMBU (bolsa de aire): Los soportes se diseñaron de tal forma que puedan desplazarse forma longitudinal, a fin de que puedan sujetar bolsas de aire de diferente medida en la posición central de los brazos de aplastamiento.

Figura 39

Diseño 3D soportes para bolsa de aire (AMBU)

**Figura 40**

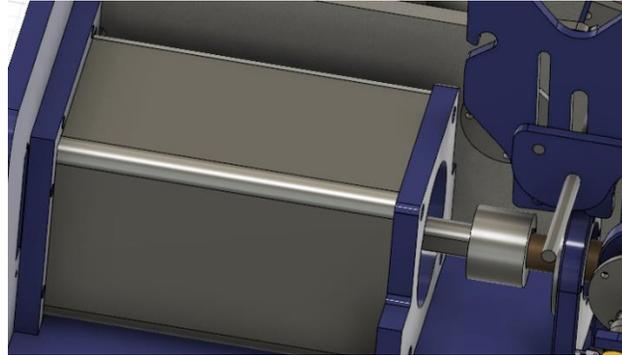
Diseño 3D brazos de aplastamiento AMBU



Ubicación del motor: Se ubicó el motor a una posición 90° con respecto al eje de transmisión de los brazos de aplastamiento, debido a la transmisión sin fin corona, lo que requirió del diseño para ubicar el motor en la posición adecuada conforme se pueda acoplar de forma concéntrica con el tornillo sin fin y proporcione el torque a la transmisión.

Figura 41

Diseño en 3D ubicación y fijación motor



Paralelamente se diseñaron soportes para la sujeción del motor a la estructura, reducción de vibraciones y concentricidad con el tornillo sin fin. Los soportes se acoplan y ajustan a las viñetas ubicadas en las paredes laterales, a fin de que puedan desacoplarse y cambiar el motor sin necesidad de desmontar completamente la estructura. De manera que la estructura soporte el torque estático del motor de aproximadamente 2 Nm.

Para la reducción de ruido y amortiguar vibraciones ocasionadas por movimiento del motor, se usó una cama de amortiguación conformada por una capa de acrílico de 3 mm y 2 cauchos de empaque de 1.5 mm de espesor en la base, con el fin de mantener concentricidad para el eje del motor y el eje del tornillo sin fin. En el contacto con la pared del motor se usó caucho de 1,5 mm para reducir la vibración, eliminar el ruido del motor al máximo posible, y evitar golpeteo del motor a la estructura.

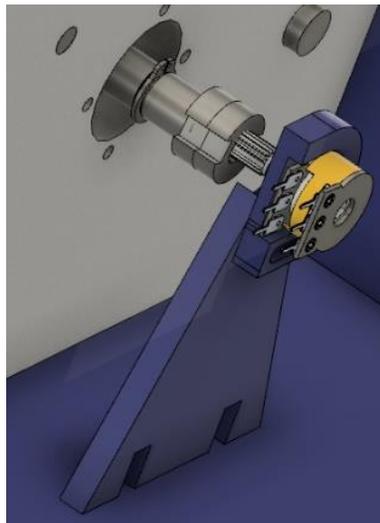
Ubicación componentes electrónicos de medición: Se realizaron adecuaciones a la estructura para instalar componentes electrónicos, con el fin de controlar el giro de los brazos de aplastamiento y la velocidad de giro del motor.

La fijación de los componentes electrónicos: el equipo cuenta con los sensores interruptor de límite (fin de carrera) y potenciómetro, los cuales requieren un soporte fijo

a la estructura y deberán contar con la capacidad de ser desmontables, por lo que se cuenta con elementos intercambiables para poder acoplar componentes de diferente tamaño a los soportes. Los mismos se diseñaron a medida de cada componente electrónico, y son impresos en filamento PLA por medio de impresión 3D a fin de obtener una mejor tolerancia.

Figura 42

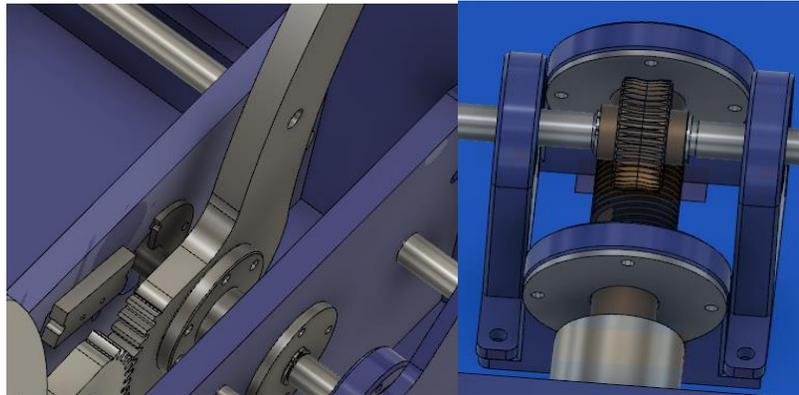
Diseño 3D soportes elementos electrónicos



Concentricidad y soportes para ejes de transmisión: La reestructuración se diseñó a fin de soportar cargas axiales en el eje de transmisión del sistema sin fin corona hacia los brazos de aplastamiento. Para el sistema sin fin corona se diseñaron soportes individuales para facilitar su ensamble y concentricidad tanto de corona-brazo de aplastamiento como con eje motor- tornillo sin fin. Mientras que para los brazos de aplastamiento se redujo la distancia entre soportes, para evitar así un pandeo en los ejes y garantizar un acople entre ambos brazos de aplastamiento.

Figura 43

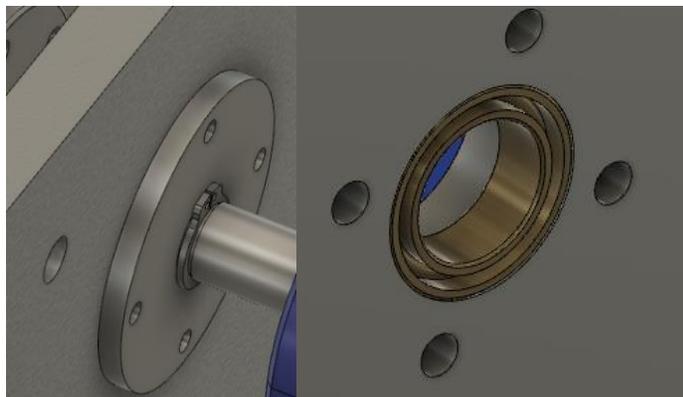
Diseño 3D ubicación y brazos de aplastamiento.



Placas soporte para rodamientos: La carga longitudinal producida en los rodamientos provocaría un desplazamiento de los mismos a lo largo del eje, por lo que se optó por colocar placas soporte que mantengan los rodamientos fijos en la estructura.

Figura 44

Diseño 3D placas de soporte para rodamiento, ubicación rodamiento.



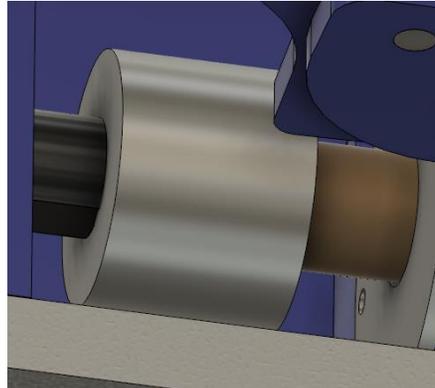
Espesor de las placas: Se dimensionaron de tal manera que los rodamientos se ubiquen completamente en la parte interna de las placas según especifica la DIN 616(1994-06) (Wailzlager, 2000) para montaje de rodamientos en estructuras. Los rodamientos seleccionados para los ejes de transmisión de 10 mm y el tornillo sin fin de

15 mm de diámetro tienen un espesor de 8 mm, por lo que ese será el espesor mínimo de la estructura.

Acople para transmisión de torque del motor al tornillo sin fin: Para la transmisión de torque y velocidad desde el motor hacia el tornillo sin fin, se diseñó un acople capaz de soportar el torque producido por el motor y transmitirlo hacia el tornillo sin fin. Este elemento contará con diámetros concéntricos de 13 y 15 mm correspondientes al eje del motor y el eje del tornillo sin fin respectivamente, y será sujeto a los mismos por medio de prisioneros, aprovechando así la parte plana del eje propia del motor NENMA 34.

Figura 45

Diseño 3D acople motor-tornillo sin fin.



Con un torque de salida del motor de máximo 2 Nm tenemos una base para seleccionar un material para la fabricación del acople.

Para un esfuerzo máximo aplicado en el acople usaremos la ecuación (117)

$$\tau = \frac{MR}{I_o} \quad (117)$$

Obtenida del libro de Resistencia de Materiales de Mayori Alejandro (Mayori, 2002).

Donde

τ = Esfuerzo torsional máximo en el acople.

M = Momento torsor, torque de salida del motor.

R = Radio externo del acople.

I_o = Momento de Inercia.

$$I_o = \frac{\pi(30^4 - 15^4)}{32} = 7,455 \times 10^4 \text{ mm}^4 = 7,455 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \quad (118)$$

$$\tau = \frac{2 \times 0,015}{7,455 \times 10^{-8}} = 4,018 \times 10^5 \text{ Pa} = 0,402 \text{ MPa} \quad (119)$$

$$S'y = 0,533Sy \quad (120)$$

$$S'y = 0,533 \times 413 = 220,13 \text{ MPa}$$

$$0,402 < 220,13 \text{ MPa}$$

Debido a que el esfuerzo requerido es menor al esfuerzo de fluencia propio del material como lo indica en el Anexo 3, el material seleccionado es adecuado para funcionar como acople entre el motor- tornillo sin fin.

Válvulas de respirador Galileo

Se realizó un análisis de los componentes mecánicos (válvulas de presión) pertenecientes al respirador Galileo PN 610207/05, debido a que estas válvulas no presentan una posibilidad de reparación, por lo que, en caso de avería, será necesario construir una réplica. Para esto es requerido conocer su funcionamiento y geometría, así como también componentes que permiten el correcto funcionamiento dentro de un ventilador Galileo.

Con el fin de realizar un análisis de funcionamiento de las válvulas, se precedió a la toma de medidas y réplicas de las válvulas:

- **Bloque de Válvula de seguridad:** Está válvula evita que el circuito respiratorio del paciente, sea capaz de sobrepasar presiones de 100 mbar, en caso de una avería del respirador Galileo y de igual manera impide que el paciente inhale aire del ambiente. El flujo de aire desde el ingreso en la parte superior hasta su desfogue se puede observar en la Figura 18. Al momento de que la presión sobrepase los 110 mbar vencerá la fuerza una placa que servirá como desfogue de presión.
- **Válvula de sobrepresión:** En caso de mal funcionamiento del respirador Galileo debido a una sobrepresión de alrededor 320 mbar, esta válvula se abre o cierra para garantizar la mezcla requerida de aire/oxígeno en el tanque, de igual manera previene el cierre de las válvulas de aire y oxígeno. El disco posterior disminuye el ruido en el tanque de sobrepresión y recircula la salida de aire por los bordes del mismo hacia el exterior. El flujo dentro de la misma se puede observar en Figura 19, citadas en los apartados 11-19 y 11-33 del Galileo service manual PN 610207/05 (Medical, 2005) respectivamente.

Geometría

Se procedió con el desensamble y toma de medidas de las válvulas citadas, en el laboratorio de reología y fluidos complejos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Asimismo, se realizó una observación de sus componentes internos y las diferentes trayectorias del fluido, en este caso aire, a través de las válvulas de seguridad y sobre presión.

Figura 46

Bloque de válvulas de seguridad

**Figura 47**

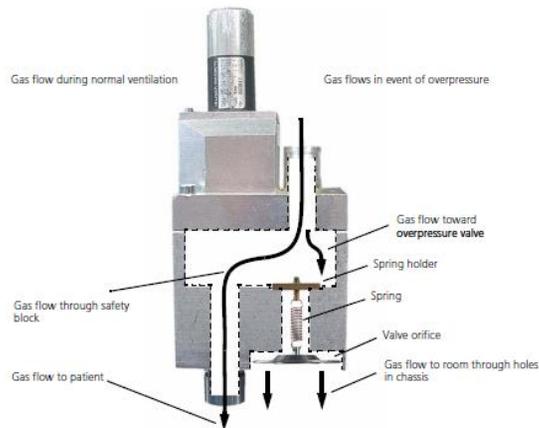
Válvula de sobrepresión.



La Figura 48 indica el funcionamiento que debe presentar el bloque de válvulas de seguridad, en el mismo se puede observar la entrada y salida del flujo a una presión normal nominal inferior a los 110 mbar, mientras que cuando se supere esta presión ejercida en la placa de seguridad, la fuerza ejercida vencerá la resistencia elástica del resorte, lo que provocará la apertura de la placa liberando así la presión en el bloque de válvulas.

Figura 48

Esquema funcionamiento válvula de seguridad por presión a 110 mbar.

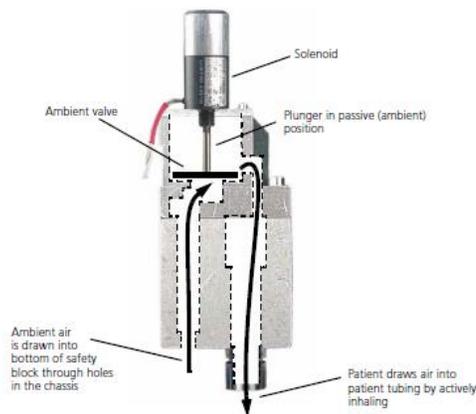


Nota: Tomado de (Hamilton, 2019)

Mientras que en caso de requerir una aspiración de aire directamente del ambiente, el manual de Galileo nos indica que se activará el solenoide permitiendo el paso de aire ambiente hacia el interior de la válvula, y su posterior conducción hacia el conducto de salida al paciente.

Figura 49

Esquema de funcionamiento por activación de solenoide.

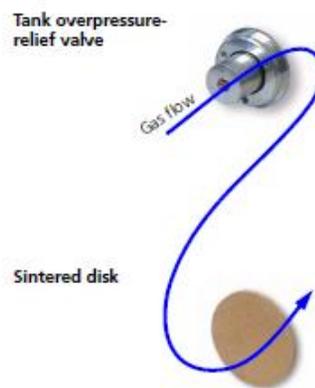


Nota: Tomado de (Hamilton, 2019)

En las válvulas de sobrepresión, se observó que la presión ejercida en la entrada a través de una placa de cobre, accionará un resorte en caso de superar una presión de 320 mbar, que permitirá la circulación del aire en el interior de la válvula y su posterior salida por alrededor del disco sinterizado, aliviando la presión en el equipo.

Figura 50

Esquema de funcionamiento válvula de sobre presión.



Nota: Tomado de (Hamilton, 2019)

Modelado 3D

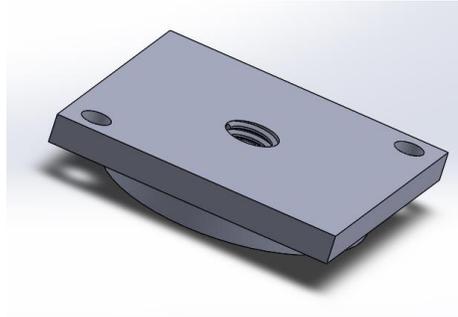
Conforme las medidas geométricas de las válvulas des ensambladas, y ayuda del software Solidworks 2018, se procedió con el modelado de las válvulas en 3D y su respectivo ensamble, con el fin de observar en mejor medida el ensamble tanto externo como interno de las válvulas.

Bloque de válvulas de seguridad.

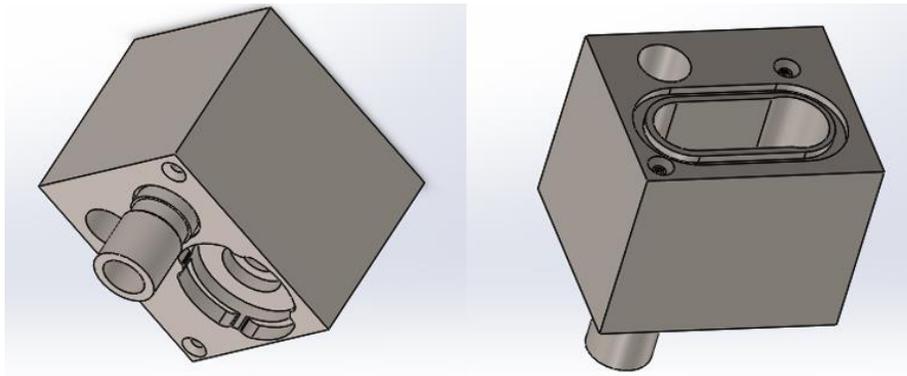
A continuación, se presentarán las piezas por separado en 3D del bloque de válvulas de seguridad previo a su ensamble.

Figura 51

3D Tapa para ajuste de solenoide.

**Figura 52**

3D Bloque inferior.

**Figura 53**

3D Bloque superior.

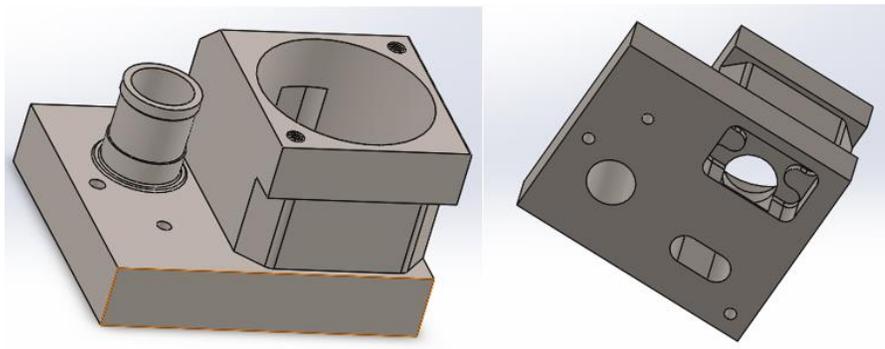


Figura 54

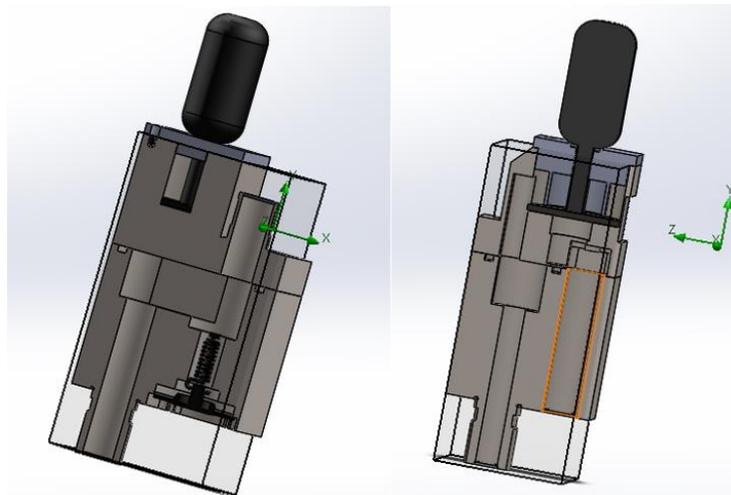
3D Paca de alivio con resorte.

**Figura 55**

3D Esquema de solenoide.

**Figura 56**

Corte Transversal bloque ensamblado.



Válvula de sobrepresión

A continuación, se presentarán las piezas por separado en 3D de la válvula de sobrepresión de seguridad previo a su ensamble.

Figura 57

3D Guía placa de empuje.

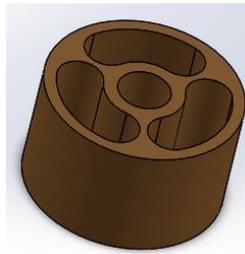


Figura 58

3D placa de empuje soporte.

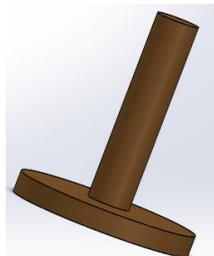


Figura 59

3D Perno de soporte interno.

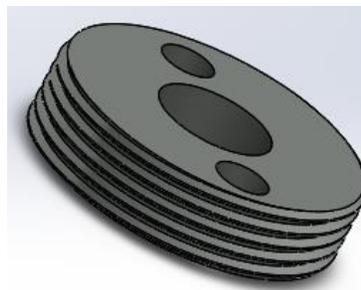
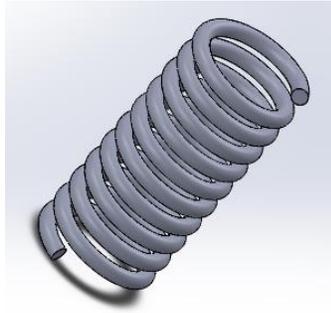
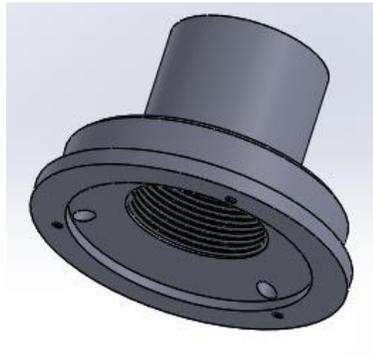


Figura 60

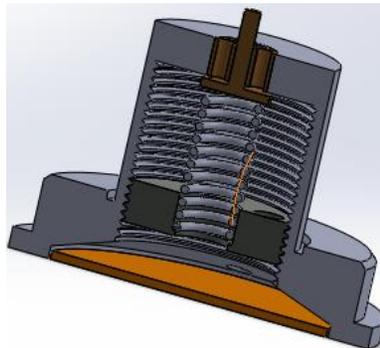
3D Resorte interno válvula de seguridad.

**Figura 61**

3D Bloque válvula de seguridad.

**Figura 62**

3D Corte Transversal válvula de seguridad.



Visualización de Funcionamiento en modelado 3D

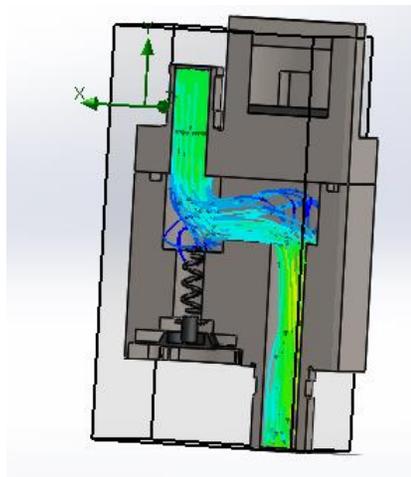
Con ayuda del software Solidworks 2018 se pudo realizar una visualización del funcionamiento de las válvulas, tanto del bloque de válvulas de seguridad, como de la válvula de sobrepresión. Para la misma se tomaron en cuenta factores como:

- Conductos de entrada y salida del fluido.
- Apertura de las placas de seguridad por efecto de carga efectuada para deformar el resorte.
- Consideración en punto de cierre y apertura del solenoide.

La Figura 63 representa la primera posición de funcionamiento del bloque de válvulas de seguridad en el cuál el fluido ingresa por el conducto superior y tiene su salida en el conducto inferior.

Figura 63

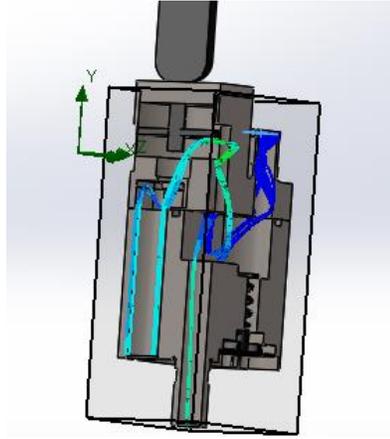
Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 1.



La Figura 64 representa la segunda posición de funcionamiento del bloque de válvulas de seguridad, en el cual el fluido ingresa por el conducto inferior expuesto a una presión ambiente gracias a la apertura del solenoide y tiene su salida en el conducto inferior.

Figura 64

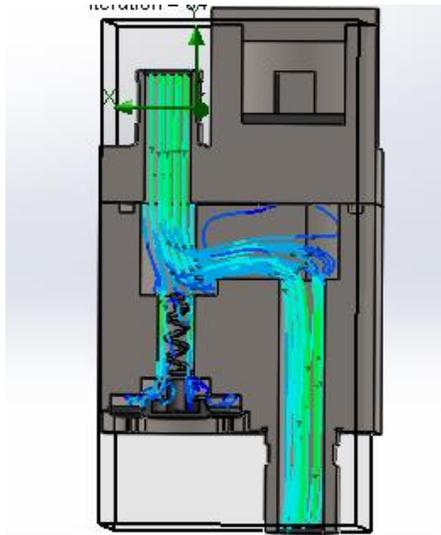
Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 2.



La Figura 65 representa la tercera posición de funcionamiento del bloque de válvulas de seguridad, en el cual el fluido ingresa por el conducto superior pero su salida se encuentra tanto por la placa de seguridad inferior y el conducto inferior del bloque, esto se debe a que la presión del flujo excede los 110 mbar deformando la geometría inicial del resorte y permitiendo el paso del fluido para la liberación de presión excedente.

Figura 65

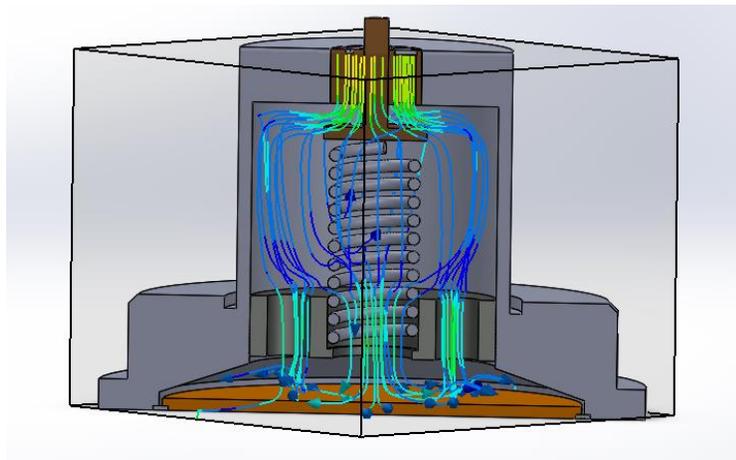
Simulación de movimiento de fluido (Aire) posición 3



La Figura 66 representa el funcionamiento de la válvula de sobre presión al instante de sobrepasar una presión interna de 320 mbar. Al momento de sobrepasar dicha presión, el tapón ubicado en la parte superior presiona el resorte deformándolo y permitiendo de esa manera el paso del fluido (aire) hacia el interior de la válvula, el flujo se direccionará hacia el disco sinterizado, el mismo tiene una función de reducir el ruido proporcionado por el flujo y la presión interna. El fluido es direccionado hacia el exterior por alrededor del disco sinterizado.

Figura 66

Simulación de movimiento de fluido Válvula sobrepresión posición 1.



CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN DE RESPIRADOR MECÁNICO EMERGENTE Y MANUFACTURA DE VÁLVULAS PARA RESPIRADOR GALILEO

La construcción del prototipo del ventilador se lo realizó en el laboratorio de procesos de manufactura ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, para la elaboración del mismo se realizaron prototipos preliminares.

Prototipo preliminar de respirador mecánico

El modelo se realizó con el fin de verificar distancias entre los apoyos, facilidad de ensamble y concetricidad tanto entre motor/tornillo sin fin, y concetricidad entre rodamientos para la flecha (eje de transmisión).

Estructura

En primera instancia la estructura se la realizo en mdf de 12 mm maquinada por corte laser como se indica en la Figura 67.

Figura 67

Estructura Ventilador emergente modelo preliminar MDF.



En relación a las observaciones de modelo de la estructura, pudimos determinar las tolerancias de medida para su maquinabilidad por corte laser, debido a que ciertos cortes como por ejemplo, los orificios para rodamientos deben tener una tolerancia baja para obtener un holgura adecuada entre la cavidad del orificio y el rodamiento interno, se pudo observar que esta tolerancia al momento de corte es de alrededor 0,2 mm menos del diámetro requerido, con lo que en el siguiente prototipo se pudo justificar el ajuste de los elementos.

Sistema de transmisión sin fin corona

En un inicio se consideró una geometría de tornillo sin fin similar a un perno M20 de 2 entradas, y su respectiva corona. El motivo de esto fue la fácil y rápida elaboración el mismo, fabricado en duralón para pruebas correspondientes.

Figura 68

Elaboración corona M20 duralón .



Las desventajas de este fueron en gran parte por temas constructivos, debido a su geometría.

Módulo $m = 0,63$

Paso axial $p_x = 2 \text{ mm}$

Altura del diente = 1,38 mm

Al ser sus dientes de esta medida y con un paso axial pequeño, se dificultó su construcción en los tornos del laboratorio de procesos, debido a que por el tiempo de uso que poseen los mismos, no pudieron cumplir con la tolerancia requerida para la construcción de los elementos.

Figura 69

Montaje tornillo sin-fin/corona M20



Al realizar las pruebas con la estructura armada y el sistema de transmisión M20, el mismo no soportó la carga completa de los brazos de aplastamiento, debido a que el área de contacto entre sin fin corona fue insuficiente para soportar la carga producida por el peso de los brazos de aplastamiento en conjunto con sus respectivos dedos armados. Por lo que se decidió cambiar el modelo del sistema de transmisión.

Se optó por incrementar el módulo del sistema a un $m=2$ lo que incrementó un poco las medidas y garantizó el área de contacto entre elementos, la geometría del mismo se cambió a:

- Módulo $m = 2$.
- Paso axial $p_x = 6,283 \text{ mm}$.

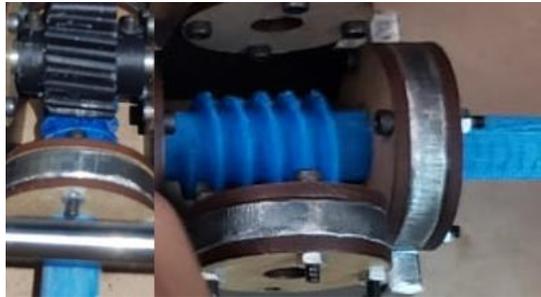
- Altura del diente $h_p = 4,33$.

Los cálculos del mismo se encuentran detallados en la página 66.

El modelo del sistema de transmisión tanto sin-fin y corona, fueron elaborados mediante modelamiento 3D e impresión 3D, la cual se la realizó en el área de impresión 3D del laboratorio de procesos de manufactura para comprobar su funcionalidad geométrica.

Figura 70

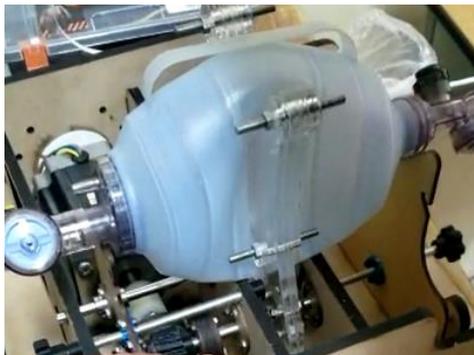
Tornillo sin fin corona $m=2$ $i=15$ en impresión 3D.



Este modelo impreso en 3D presentó buenos resultados en un principio, transmitiendo el movimiento del motor hacia los brazos de aplastamiento con carga completa (brazos de aplastamiento armado con sus respectivos dedos) incluida la bolsa de aire AMBU.

Figura 71

Funcionamiento con sistema de transmisión en PLA+.



El mismo presentó una falla esperada al momento de incrementar la resistencia producida al incluir la bolsa de aire AMBU junto con su bolsa de reservorio pulmón, por lo que pudimos observar una ruptura en el elemento debido a que se excedió la carga soportada por el material, con lo que pudimos concluir que el funcionamiento del modelo del elemento es el adecuado y se procedió a realizar los cálculos de resistencia para la selección del material en el cuál fue elaborado, los cálculos del mismo se encuentran en la página 90.

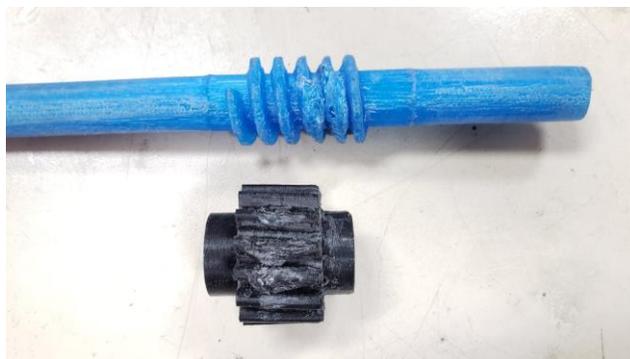
Figura 72

Momento de la falla del sistema de transmisión sin fin corona.



Figura 73

Tornillo sin fin y corona después de la falla por resistencia.



Acople motor- tornillo sin fin

El acople se lo realizó inicialmente en material duralón debido a su fácil maquinabilidad. El acople constó de 2 cavidades, una para el eje del motor de 14 mm de diámetro y otra para el eje del tornillo sin fin con 15 mm, 4 prisioneros distribuidos de manera que se ajusten a los ejes y permitan la transmisión del movimiento.

Figura 74

Acople de duralón instalada.



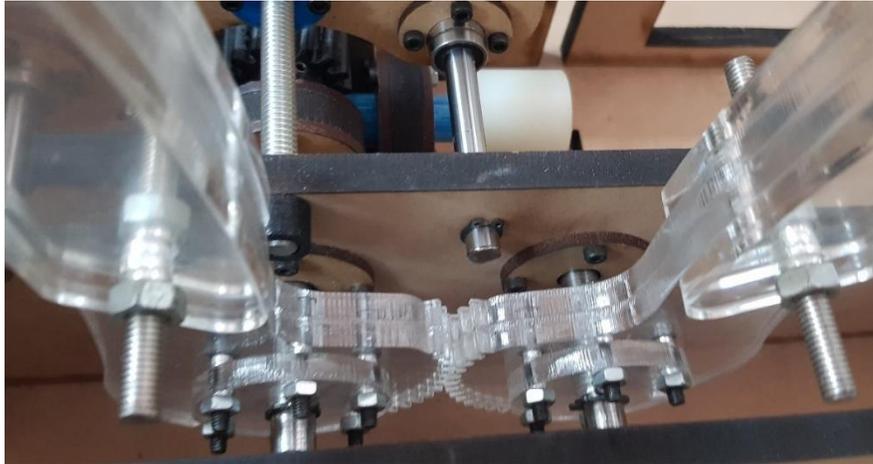
El acople funciono de manera correcta salvo un desajuste por parte de los prisioneros, por lo que se decidió un cambio en el material del mismo.

Brazos de aplastamiento

En un inicio los brazos de aplastamiento fueron elaborados por corte laser en acrílico de 5 mm, pero el material demostró no presentar la resistencia adecuada en los dientes inferiores del brazo, por lo que se tomó la decisión de cambiar el material a un acero inoxidable, la razón del mismo es tomando la consideración de que los brazos estarán en contacto con la bolsa de aire AMBU.

Figura 75

Brazos de aplastamiento en acrílico de 9 mm.



Soportes para bolsa de respiración AMBU

Los soportes se construyeron inicialmente con mdf 3 mm, pero debido a que no soportarán una gran carga y tendrán que resistir a la flexión con un peso reducido se decidió cambiar su material y espesor para el siguiente modelo.

Figura 76

Soportes para bolsa de respiración AMBU



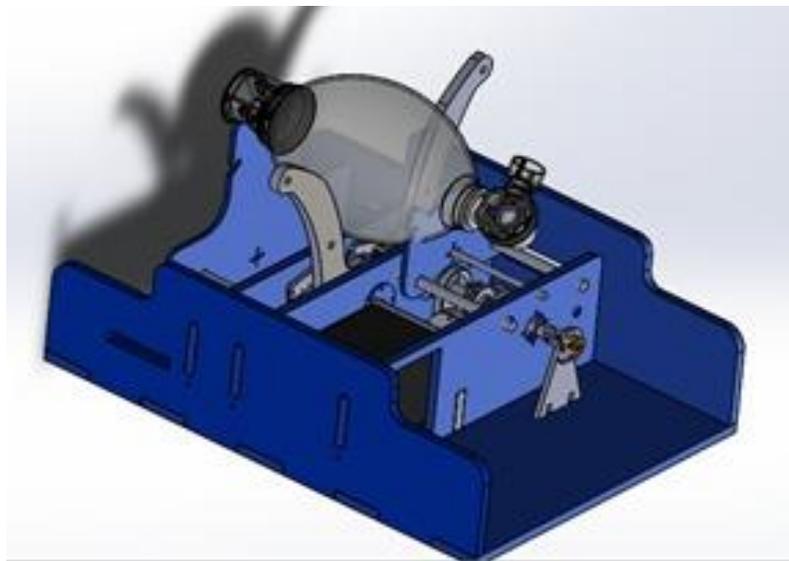
Las guías usadas fueron inicialmente varillas de acero AISI 1020 de 8 mm maquinado en torno, pero debido a que el maquinado presento un desvío dándole una

geometría cónica, se decidió comprar ejes pulidos para el siguiente modelo, se moverán gracias de una varilla roscada de 5/16 in la cual se encargará de controlar la posición de los soportes para la ubicación de bolsas de respiración AMBU de distinto tamaño.

Esquema de modelo diseñado en 3D.

Figura 77

Esquema final del equipo ensamblado.



Prototipo final y correcciones de respirador mecánico

Estructura

Después de realizar las respectivas correcciones en la geometría, se construyó la estructura por corte laser en acrílico de 9mm, mientras que los soportes para fijación y distancia entre centros de tornillo sin fin corona se la realizo por corte laser en acero SAE A36 recubierto con pintura anticorrosiva, la razón del mismo se debe a que se requiere mayor estabilidad en los soportes en el sistema de transmisión por efecto de la fuerza del motor.

Figura 78

Soportes para sistema de transmisión en acero A36.



La estructura fue fijada completamente por pernos M3x16 mm y amortiguada en la base con caucho de 1,5 mm.

En adición se elaboró una cama de amortiguamiento la cuál consta de 2 capas de caucho de 1,5mm y una capa de acrílico de 2 mm, para así reducir la vibración del motor, evitar golpeteo del mismo con la estructura, reducir el ruido y conservar la concetricidad con el tornillo sin fin.

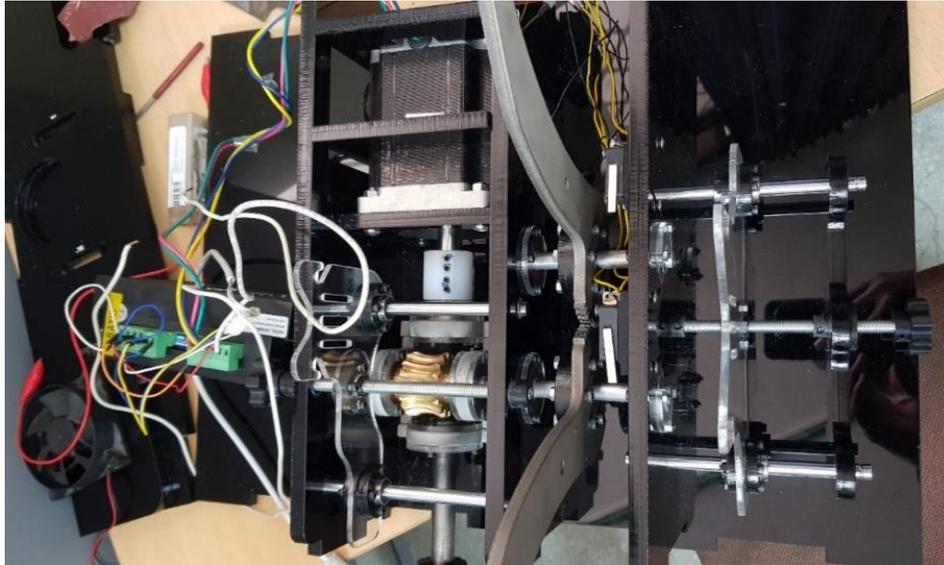
Figura 79

Estructura cortada en acrílico de 9 mm.



Figura 80

Equipo ensamblado en acrílico de 9 mm.

**Sistema de transmisión**

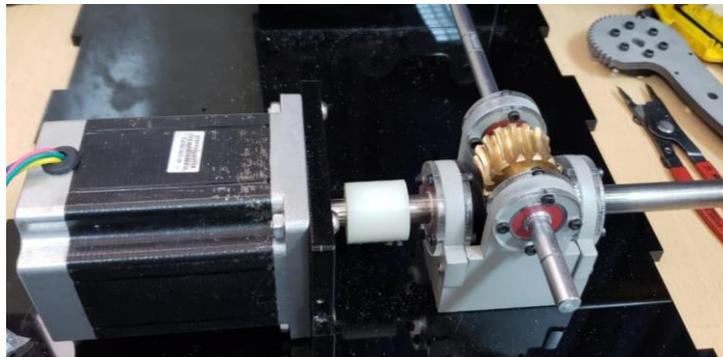
Conforme se pudo observar con las pruebas realizadas con el modelo fabricado por impresión 3D, la fabricación final se la realizó en un conjunto de material acero AISI8620 endurecido por cementación y bronce SAE40, los cálculos tanto de geometría como resistencia del material se encuentran detallados en la página 66 y 90. El tornillo sin fin se fijó a la estructura gracias a los soportes de fijación elaborados en acero A36 con cubierta de pintura anticorrosiva de forma concéntrica al motor, mientras que la corona se encuentra a una distancia entre centros de 25 mm gracias los soportes de fijación, transmite la rotación y el torque a la flecha de transmisión gracias a la chaveta y prisioneros ubicados en la corona.

Figura 81

Tornillo sin fin AISI8620 cementado, corona bronce SAE40.

**Figura 82**

Ensamble sistema de transmisión- motor.



Flechas de transmisión.

Las flechas de transmisión corona-brazos de aplastamiento fueron fabricadas en un acero K110 de 10 mm de diámetro, los cálculos de los mismos se encuentran en la página 80 , son ensambladas en la estructura mediante anillos de fijación, los cuales mantendrán la posición de las mismas y pasarán a través de rodamientos ubicados internamente en la estructura para garantizar la rotación concéntrica de los ejes, estas flechas transmiten el torque gracias a su diseño enfocado a transmisión por medio de chavetas para la corona y los brazos de aplastamiento.

Figura 83

Flecha fabricada en acero K110.



El desgaste producido por la fricción entre el tornillo sin fin y la corona fue la esperada por lo que procedió a usar grasa de Litio como lubricante para reducir el desgaste por fricción entre los elementos.

Para mantener una lubricación constante se elaboró un tanque de lubricación el cuál se ubicó en la cavidad de los soportes de fijación y se lo lleno con grasa de litio.

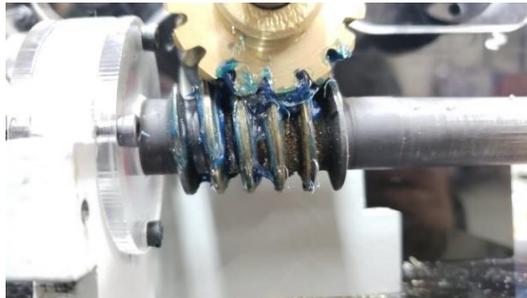
Figura 84

Desgaste de conjunto sin fin corona sin lubricación.

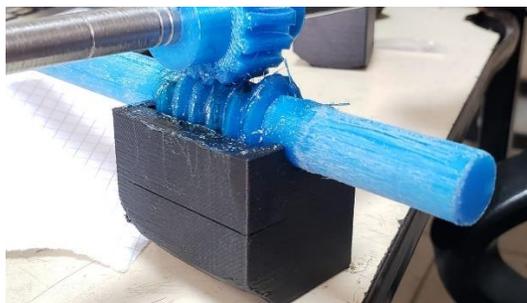


Figura 85

Lubricación en conjunto sin fin corona.

**Figura 86**

Prueba de funcionamiento tanque de lubricación.



Acople motor- tornillo sin fin

El acople final se lo elaboró en acero AISI1045 presentando mayor estabilidad en la transmisión de movimiento y torsión hacia el tornillo sin fin.

Figura 87

Acople en acero AISI 1045.



Brazos de aplastamiento

El cambio en los brazos de aplastamiento fue exclusivamente en el material de fabricación, se lo realizó mediante corte laser en acero inoxidable AISI 304, y se lo pulió posteriormente por método de sandblast en el laboratorio de procesos de manufactura. Los brazos adquieren la transferencia de movimiento por medio de una chaveta ensamblada en la parte interna y fijada en su posición gracias a anillos de retención ubicados en los extremos.

Figura 88

Soporte tornillo sin fin y brazo de aplastamiento.



Las consideraciones de los brazos de aplastamiento se encuentran en la página 58, los mismos serán lubricados en los dientes inferiores con grasa para evitar posible desgaste.

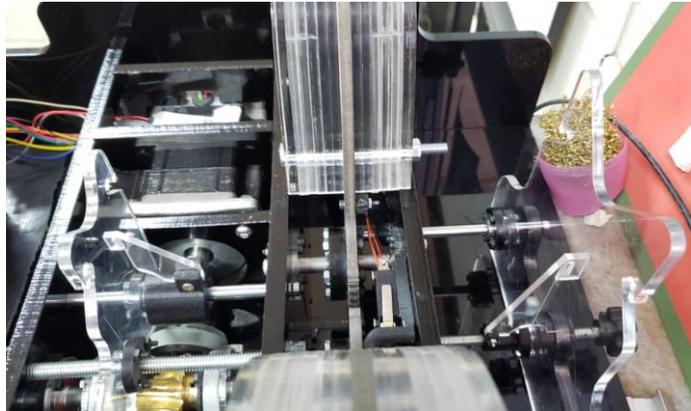
Soportes para bolsa de respiración AMBU

Después de observar el comportamiento de los soportes en el primer diseño se fabricaron los soportes móviles en acrílico de 5 mm, incluyendo un nervio fabricado en

acrílico de 3 mm con la finalidad de evitar la flexión en los mismos por la acción de aplazamiento de la bolsa de aire por parte de los brazos.

Figura 89

Soportes en acrílicos ensamblados con nervio.



Accesorios

Se diseñaron complementos para diversas funciones dentro del equipo, los cuales servirán para movilidad sujeción, pulsación, se encuentran enlistados a continuación:

Tabla 3

Complementos impresión 3D

N°	Elemento	Cantidad	Descripción
1	Perilla Tornillo Sin-Fin	1	Perilla para movimiento manual de los brazos de aplastamiento
2	Perilla soportes AMBU	2	Perilla para movimiento de soportes AMBU
3	Pulsadores para sin fin carrera	2	Pulsadores para accionamiento de sensor fin de carrera

N°	Elemento	Cantidad	Descripción
4	Sujetador para eje roscado 5/16"	2	Sujetador con rosca interna para movilidad a lo largo del eje roscado
5	Soportes Fin de carrera	2	Soportes intercambiables para sensor fin de carrera
6	Sujetador potenciómetro	1	Soporte intercambiable para sujetador de potenciómetro
7	Conector flecha de transmisión-potenciómetro	1	Acople para potenciómetro-flecha de transmisión
8	Soportes para nervio	2	Acoples para sujeción de nervio anclado a soportes de la bolsa de aire AMBU
9	Tanque de lubricación	1	Tanque de lubricación para sistema de transmisión

Tabla 4

Elementos realizados por corte laser

N°	Elemento	Cantidad	Descripción
9	Placa de soporte para rodamientos	20	Placas para soporte de carga axial y fijación interna de rodamientos
10	Nervios para soportes AMBU	2	Nervios para evitar flexión en rodamientos

N°	Elemento	Cantidad	Descripción
11	Placa para ubicación de potenciómetro	1	Placa para ubicación concéntrica potenciómetro-flecha de transmisión
12	Placa externa para guías	1	Placa para sujeción de las guías soporte AMBU
13	Dedos para brazos de aplastamiento	24	Dedos para incrementar el área de contacto con bolsa de aire AMBU
14	Acople brazos de aplastamiento	2	Juntas para brazos de aplastamiento utilizadas como manzana, para incrementar el área de contacto con la chaveta

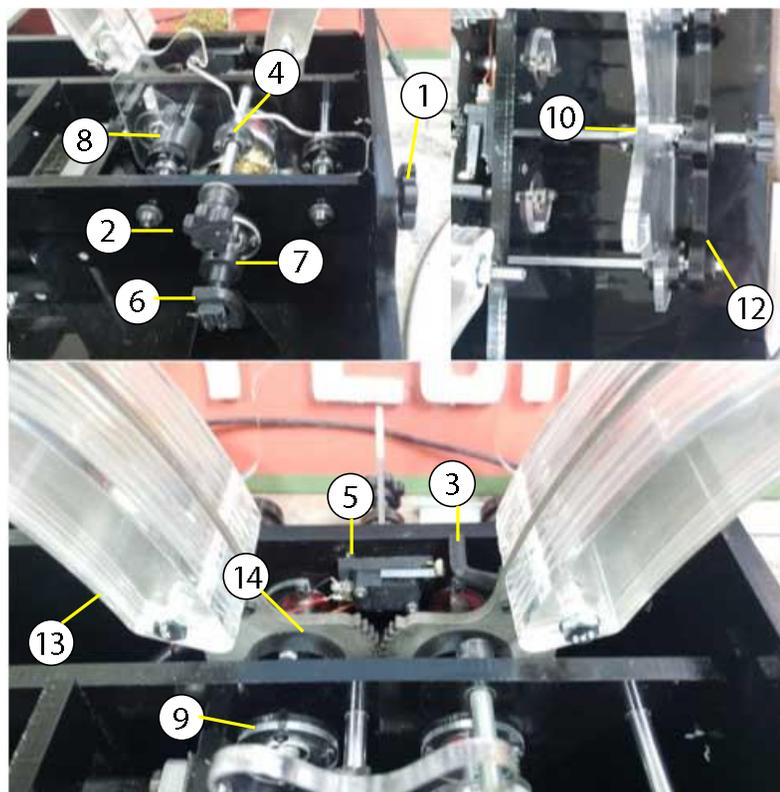
Tabla 5*Elementos de sujeción*

N°	Elemento	Descripción
1	Pernos M3x16	Utilizados para el ensamble de la estructura: paredes, soportes y placas de soporte para rodamientos
2	Pernos M4x16	Utilizados para sujeción acople y brazos de aplastamiento, sujeción de pestañas para soporte de motor
3	Pernos M6x25	Pernos para sujeción de motor a la estructura

N°	Elemento	Descripción
4	Rodamientos 10x26x8	Rodamientos para ejes de 10mm
5	Rodamientos 15x32x9	Rodamientos para tornillo sin fin
6	Anillos de retención 10mm	Anillos para sujeción de flechas y brazos de aplastamiento
7	Anillos de retención 8mm	Anillos para sujeción ejes guías para soporte AMBU

Figura 90

Ubicación accesorios en el equipo.



Válvulas de respirador Galileo

Para la construcción de las válvulas se procedió a definir características para un prototipo funcional, las mismas se encuentran detalladas a continuación:

- Material de bajo costo.
- Facilidad de construcción debido a su geometría.
- Material capaz de soportar presiones internas.
- Material de bajo peso.
- Posibilidad de cambio en el diseño y rápida construcción.

Tomando en cuenta la dificultad geométrica y la necesidad de una rápida fabricación de las mismas para comprobar el funcionamiento y paso de fluido de las válvulas, se decidió utilizar el método de impresión 3D puesto que el mismo nos garantiza una facilidad en la fabricación y factibilidad de elaboración de distintas geometrías, para poder garantizar las características propuestas, se tuvieron que definir parámetros dentro de la configuración de la impresión, los mismos fueron establecidos después de una serie de pruebas realizadas en diversas impresiones de los complementos.

Impresión 3D

Para la impresión 3D se utilizó una impresora marca TEVO TARANTULA proporcionada por el laboratorio de reología con un material plástico PLA Pro+, el cuál es usado en piezas que requieren mayor resistencia mecánica y el software Ultimaker Cura para la elaboración del algoritmo de impresión y así definir los siguientes parámetros:

Con una altura de capa de 0.2 mm y un ancho de línea de 0.4mm podemos obtener una buena calidad en el acabado final de las piezas elaboradas, de igual manera está configuración nos permite una mayor velocidad en la impresión.

Figura 91

Parámetros de calidad en el software Ultimaker Cura

Calidad			
Altura de capa	🔗	0.2	mm
Altura de capa inicial	🔗	0.3	mm
Ancho de línea		0.4	mm
Ancho de línea de pared		0.4	mm
Ancho de línea de la pared exterior		0.4	mm
Ancho de línea de pared(es) interna(s)		0.4	mm
Ancho de línea superior/inferior		0.4	mm
Ancho de línea de relleno		0.4	mm
Ancho de línea de la capa inicial		100.0	%

El grosor y número de líneas de las paredes tanto laterales como superiores e inferiores nos garantizará una resistencia moderada de la pieza y una estabilidad de la misma, de igual manera con esta configuración podemos reducir el porcentaje de llenado en la pieza permitiéndonos optimizar el gasto del material.

Figura 92

Parámetros de espesor en paredes en el software Ultimaker Cura.

Paredes			
Grosor de la pared		0.8	mm
Recuento de líneas de pared	🔗 ⓘ	5	
Optimizar el orden de impresión de paredes		<input type="checkbox"/>	
Rellenar espacios entre paredes		En todas partes	▼
Expansión horizontal		0.0	mm
Superior o inferior			
Grosor superior/inferior		0.8	mm
Grosor superior		0.8	mm
Capas superiores	ⓘ	5	
Grosor inferior		0.8	mm
Capas inferiores	ⓘ	5	

Los parámetros de relleno nos permiten generar diversos tipos de llenado y su porcentaje general de material dentro de la pieza, el patrón de relleno trihexagonal

proporciona un soporte para cargas de compresión y tensión en todas las direcciones dentro de los elementos.

Figura 93

Parámetros de rellenos en el software Ultimaker Cura.

Relleno	
Densidad de relleno	20.0 %
Distancia de línea de relleno	6.0 mm
Patrón de relleno	Trihexagonal
Multiplificador de línea de relleno	1
Porcentaje de superposición del relleno	10.0 %
Grosor de la capa de relleno	0.2 mm
Pasos de relleno necesarios	0

Los parámetros de material son fijados conforme las indicaciones del material PLA

Pro+

Figura 94

Parámetros de temperatura en el software Ultimaker Cura.

Material	
Temperatura de impresión	200.0 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	200.0 °C
Temperatura de impresión inicial	190.0 °C
Temperatura de impresión final	185.0 °C
Temperatura de la placa de impresión	60 °C
Temperatura de la pla...ón en la capa inicial	60 °C

La velocidad de impresión se fijó de acuerdo a los requerimientos de las piezas, debido a que ciertos elementos poseen paredes roscadas se requirió una baja velocidad en paredes exteriores, evitando así la deformación en las paredes y permitiendo su correcta geometría una vez finalizada la impresión.

Figura 95

Parámetros de velocidad en el software Ultimaker Cura.

Velocidad		
Velocidad de impresión		60.0 mm/s
Velocidad de relleno		60.0 mm/s
Velocidad de pared		30.0 mm/s
Velocidad de pared exterior	↶ ⓘ	20.0 mm/s
Velocidad de pared interior		60.0 mm/s
Velocidad superior/inferior		30.0 mm/s
Velocidad de soporte	⌘	60.0 mm/s
Velocidad de desplazamiento		120.0 mm/s
Velocidad de capa inicial		30.0 mm/s
Activar control de aceleración	⌘	<input type="checkbox"/>
Activar control de impulso	⌘	<input type="checkbox"/>

Los soportes son generados en ciertos elementos debido a que poseen voladizos en paredes exteriores o en su defecto cavidades interiores que requieran un soporte para el asentamiento del material en capas superiores.

Figura 96

Parámetros para soportes en el software Ultimaker Cura.

Soporte		
Generar soporte	⌘ ↶	<input checked="" type="checkbox"/>
Estructura de soporte	⌘	Normal
Colocación del soporte	⌘ ↶	Tocando la placa ...
Ángulo de voladizo del soporte	⌘	50.0 °
Patrón del soporte	⌘	Zigzag
Densidad del soporte	⌘ ↶ ⓘ	5.0 %
Expansión horizontal del soporte	⌘	0.0 mm
Grosor de la capa de relleno de soporte	⌘	0.2 mm
Escalones de relleno de soporte	⌘	0
Habilitar interfaz del soporte	⌘	<input type="checkbox"/>
Habilitar techo del soporte	⌘	<input type="checkbox"/>
Habilitar suelo del soporte	⌘	<input type="checkbox"/>

Con los parámetros fijados y con la asesoría del ingeniero a cargo de la impresora, se pudieron elaborar adecuadamente las piezas prototipo para las válvulas y su ensamble.

Figura 97

Impresión 3D en impresora marca TEVO TARANTULA.



Figura 98

Elementos de válvulas de seguridad impresas en 3d.



CAPÍTULO V: ENSAYOS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

Respirador mecánico

Se procedieron a realizar ensayos con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del equipo e integridad de la estructura, para lo que se establecieron parámetros de operación similares a los que se plantearían en un respirador emergente, con los cuales se trabajarán en cada una de las pruebas.

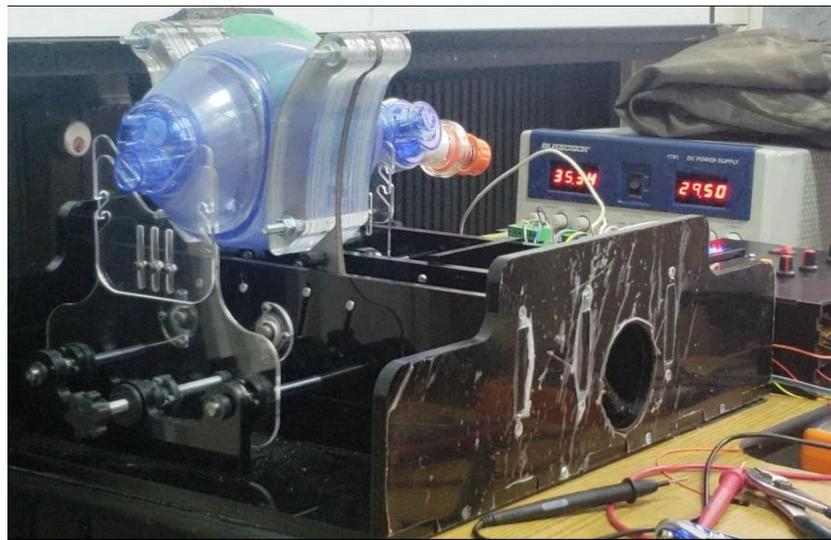
Prueba 1 con resistencia (03/06/2021)

La prueba de funcionamiento que se llevó a cabo tuvo una configuración de:

- 24 bpm.
- 85% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

Figura 99

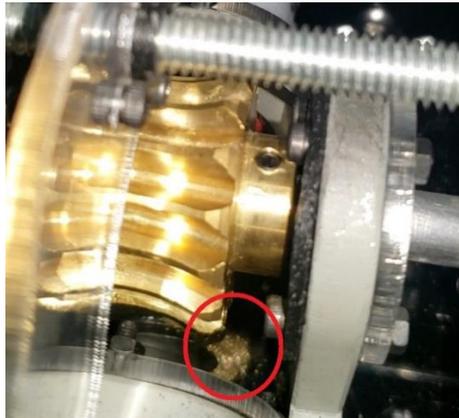
Funcionamiento del equipo prueba 1.



Mientras se realizaba la prueba, se notó un desgaste de la corona debido a la falta de lubricación, ya que solamente se había colocado grasa en el conjunto como se ve en la Figura 85, debido a esto se decidió parar la prueba a las 3 horas de haberla iniciado.

Figura 100

Desgaste de la corona después de 3 horas.



Al realizar la revisión de la integridad estructural del equipo, no se evidenció ninguna falla con respecto a desgaste en los brazos ni fisuras en los elementos de acrílico, pero si se notó que los soportes móviles presentaban una flexión debido a la acción de abrir y cerrar los brazos.

Prueba 2 sin resistencia (30/06/2021)

Para esta prueba se corrigieron los problemas encontrados en la prueba 1, es decir, se agregó un tanque de lubricación con grasa como se ve en la Figura 86, además se fabricaron nuevos soportes móviles de un espesor mayor de 5 mm y se agregaron nervios, estos cambios están evidenciados en la Figura 89.

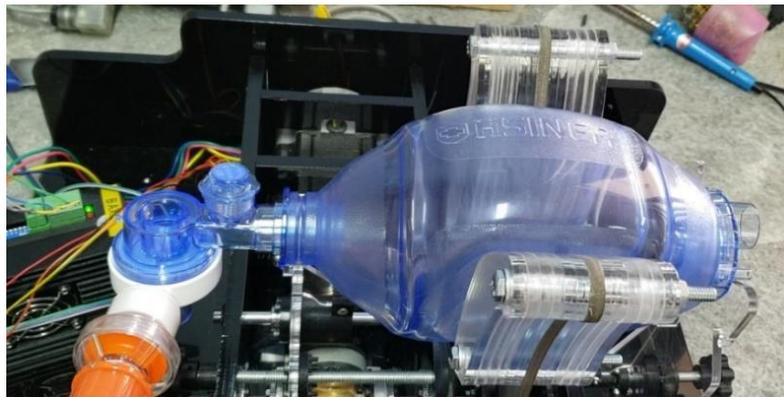
Los parámetros de la prueba fueron los siguientes:

- 25 bpm.
- 86% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

Esta prueba se realizó durante 4 horas debido a disponibilidad de tiempo, con los cambios realizados ya no existía un gran desgaste de la corona sino un desgaste leve que corresponde a su funcionamiento normal, además en los soportes móviles se redujo en gran medida la flexión de los mismos y solo se presenta de forma leve, la cual no es significativa.

Figura 101

Funcionamiento del equipo prueba 2



Al finalizar la prueba y realizar la revisión de integridad estructural, se encontró que el acople entre el motor y el tornillo sin fin al estar fabricado en duralón como se ve en la Figura 82, presentaba un desgaste en los alojamientos para los prisioneros, lo cual hacía que exista un descentramiento entre el eje del motor y el tornillo sin fin, no se evidenciaron otro tipo de fallas en el resto de la estructura del equipo.

Prueba 3 sin resistencia (08/07/2021)

Para corregir el problema presentado en la prueba 2 se fabricó el acople en acero AISI 1045 Figura 87 para mejorar su estabilidad, además para asegurar la concentricidad entre el eje del motor y el tornillo sin fin, se agregó una cama conformada por palcas de acrílico y caucho como se detalla en página 117.

La prueba se realizó con los siguientes parámetros:

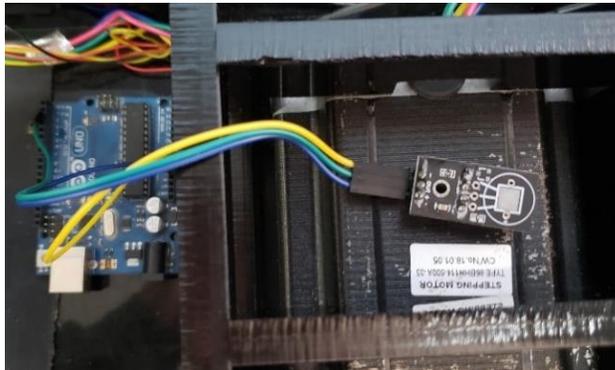
- 25 bpm.
- 90% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

La prueba se realizó durante 5 horas por disponibilidad de tiempo, durante el cual no se notó fallas en ningún elemento, adicional se tomó datos de temperatura mediante un sensor de humedad y temperatura DHT11 Figura 102, con lo cual luego de las 5 horas de funcionamiento subió a una temperatura de 35.20 ° Anexo 3.

Al realizar la revisión de integridad estructural no se presentó ninguna falla.

Figura 102

Sensor de humedad y temperatura DHT11



Prueba 4 sin resistencia (12/07/2021)

Dado que en la prueba 3 no se presentaron novedades, se procedió a realizar la prueba con los mismos parámetros:

- 25 bpm.
- 90% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

Figura 103

Funcionamiento del equipo prueba 4



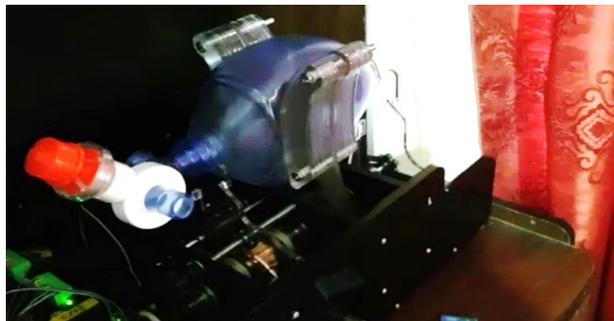
Durante la prueba también se tomaron datos de temperatura y al finalizarla después de 6 horas de funcionamiento llegó a una temperatura de 37 °C, sin presentar ninguna falla en la integridad estructural del conjunto.

Prueba 5 sin resistencia (17/07/2021)

Esta prueba se plateó para realizarla durante 24 horas, motivo por el cual se procedió a llevar el equipo a una de nuestras casas para poder monitorearlo durante las 24 horas, debido a que el control electrónico, correspondiente al grupo que trabaja en conjunto para la automatización del equipo, no contaba con un paro de emergencia en caso de alguna falla y se debe realizar el paro del equipo de forma manual.

Figura 104

Funcionamiento del equipo prueba 5.



La prueba se empezó el día sábado 17 de Julio a las 11:00 am con los siguientes parámetros:

- 25 bpm.
- 85% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

Durante la prueba el sensor de temperatura no estaba tomando datos en las primeras horas de funcionamiento, el grupo a cargo de la parte de control y sensores nos ayudó arreglando este problema mientras seguía funcionando el equipo, se logró arreglar la toma de datos a las 2 horas, es decir, a las 13 horas tomando valores cada 5 minutos.

Adicionalmente se tomó datos de la posición de los brazos mediante un potenciómetro, para determinar si existía alguna pérdida en el ángulo de apertura y cierre de los brazos.

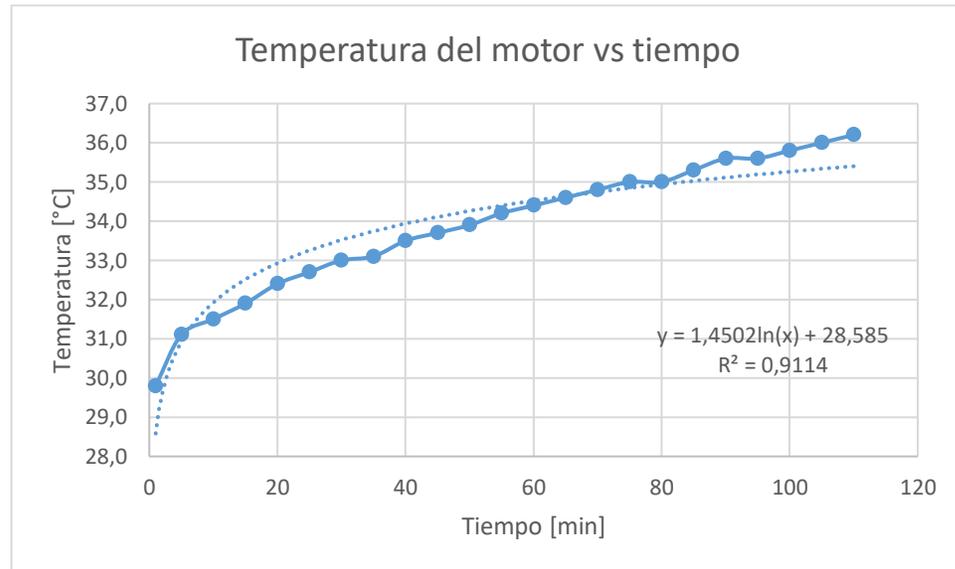
La prueba se mantuvo hasta las 18:00 debido a que, por un problema en la parte electrónica de control del equipo, focalizada en el fin de carrera que nos da la señal de finalización de apertura de la pinza, ocasionó un cierre apresurado de los brazos y no permitió continuar con su operación parando la prueba.

Temperatura

Se presentó un problema en el almacenamiento de los datos de temperatura, por lo cual solo se tienen valores hasta las 14:50 graficados en la siguiente figura.

Figura 105

Comportamiento de la temperatura del motor respecto al tiempo.



Como podemos observar en la gráfica y en la ecuación obtenida de la línea de tendencia, la curva de temperatura sigue una tendencia logarítmica, por lo que podemos esperar que la temperatura tienda a estabilizarse conforme avanza el tiempo de operación del motor.

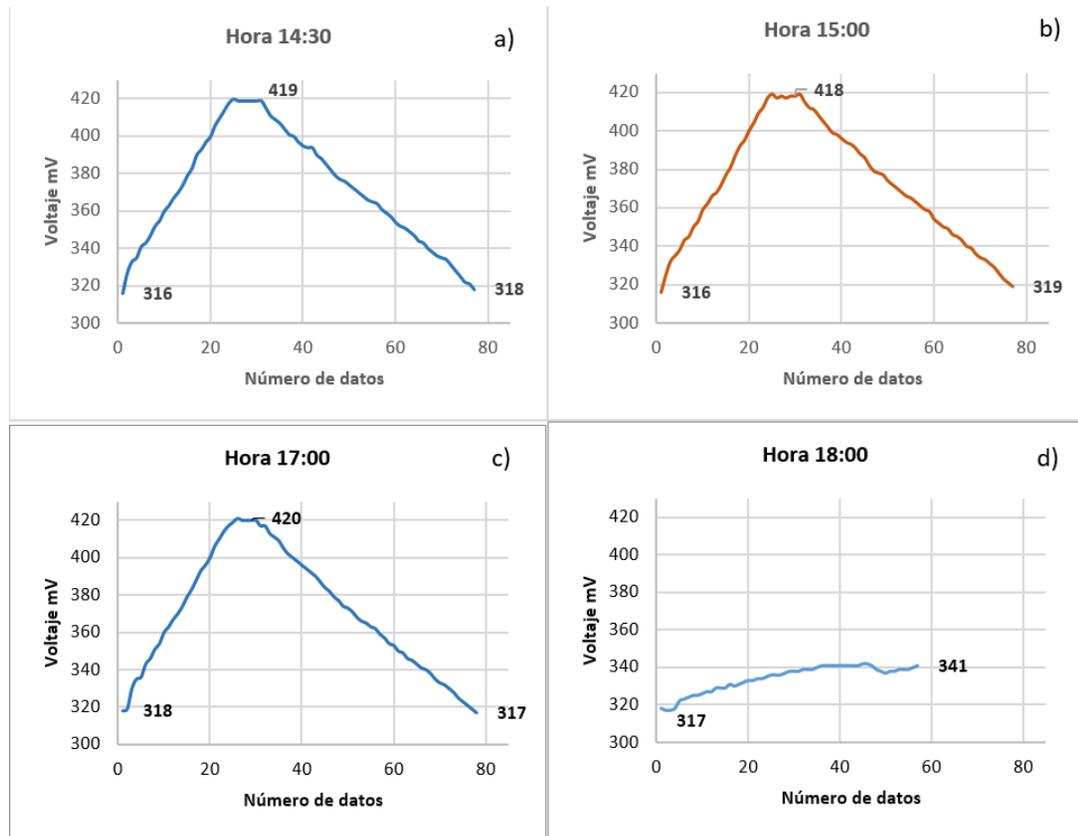
Posición

La medición de la posición angular de los brazos se realizó utilizando un potenciómetro, el cual nos proporciona datos en unidades de bits correspondientes a la posición en la que se encuentra la flecha de transmisión. Para este análisis no se requiere la calibración del sensor.

Los datos de posición de los brazos se tomaron cada 30 minutos, durante el intervalo de apertura y cierre de los mismos, teniendo así en la Figura 106 las curvas en distintas horas.

Figura 106

Posición de los brazos de aplastamiento en distintas horas.



Como se puede ver en la Figura 106, las curvas a), b) y c) tienen una tendencia muy similar, donde los brazos completamente abiertos tienen un valor de 317 ± 1 [u], al cerrarse su valor asciende a 419 ± 1 [u], y finalmente vuelve a su posición de apertura con un valor de 316 ± 1 [u], Estos valores nos indican que los brazos en su proceso de apertura y cierre no tienen una pérdida en su ángulo de operación, es decir, siguen aplastando en la misma magnitud a la bolsa de respiración manual (ambu).

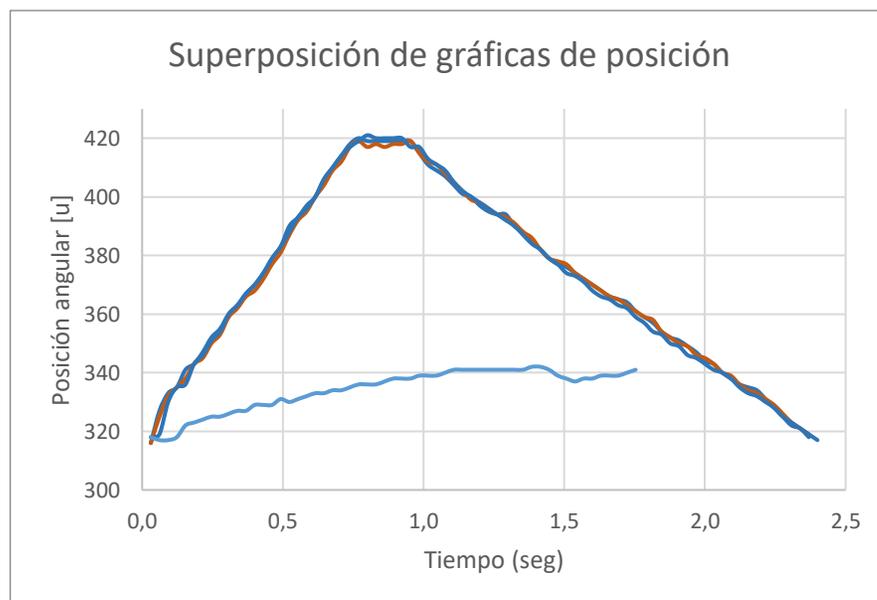
Como se mencionaba en el apartado de temperatura, se tuvo que parar la prueba por mal funcionamiento del control electrónico del equipo. Este fallo es evidente en la curva d) de la Figura 106, donde empieza correctamente con la apertura teniendo un valor de

317 [u] pero llega a un valor en el cierre de 341 [u], ya que los brazos no llegaron a cerrarse y por lo tanto se detuvo a la prueba interrumpiendo la toma de datos.

En la Figura 107 se presenta una superposición de las curvas de posición, donde es más evidente que en distintas horas de operación, los brazos mantienen sus posiciones de apertura y cierre.

Figura 107

Comparación graficas de posición en distintas horas.



Finalizada la prueba se realizó la comprobación de la integridad estructural del equipo y no se presentaron fallas mecánicas en los componentes, desgaste en los brazos ni fisuras en los elementos de acrílico.

Prueba 6 con resistencia (03/08/2021)

Al no presentarse ninguna falla en la prueba 5, se realizó esta prueba agregando una bolsa pulmón, la cual nos servirá como resistencia en la salida de flujo de aire, que nos permitirá comprobar que el equipo proporciona una presión adecuado en la salida de la bolsa de aire.

Figura 108

Funcionamiento del equipo prueba 6.



La prueba se empezó a las 08:00, con los siguientes parámetros:

- 25 bpm.
- 85% de aplastamiento del AMBU.
- Relación i/E 2:1.

Durante la prueba, el sensor de temperatura no estaba tomando datos y aunque se intentó solventar el fallo, no se logró hacerlo y por lo tanto la prueba se condujo sin la toma de esta variable.

La prueba se mantuvo hasta las 15:00, teniendo así un funcionamiento de 7 horas, durante las cuales no se presentó ningún fallo, al realizar la inspección en busca de fallas mecánicas, no se evidenció ninguna falla en la integridad estructural del conjunto.

Con todas las pruebas detalladas y una vez realizadas las correcciones pertinentes, se puede evidenciar que el equipo funciona correctamente y cumple con el propósito para el que fue construido.

Válvulas de respirador Galileo

Una vez obtenidos los complementos de las válvulas en impresión 3D, se procedió con el ensamble de cada una. Como podemos observar en las Figura 109 y Figura 110, el ensamble con los elementos de sujeción, empaques y complementos pertenecientes a cada válvula se pudo completar sin ningún problema.

Figura 109

Ensamblaje bloque de válvulas de seguridad impresión 3D / Original.



Figura 110

Ensamblaje válvula de sobrepresión impresión 3D/ Original.



Posterior al ensamble se instalaron las válvulas fabricadas en impresión 3D en el ventilador Galileo, reemplazando las válvulas originales con el objetivo de comprobar el ajuste pertinente en su lugar de operación, la entrada y salida de flujo por el interior de las válvulas, y el accionamiento de sus complementos a las presiones requeridas por cada válvula.

Figura 111

Válvula de sobrepresión instalada.

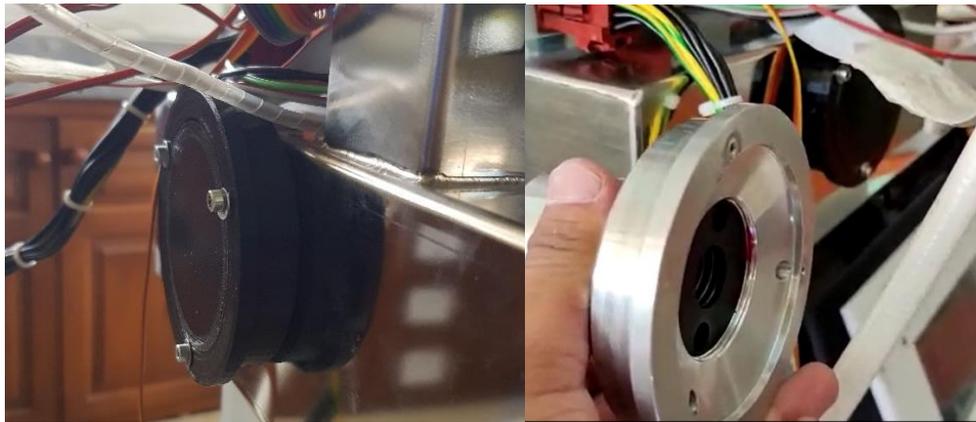
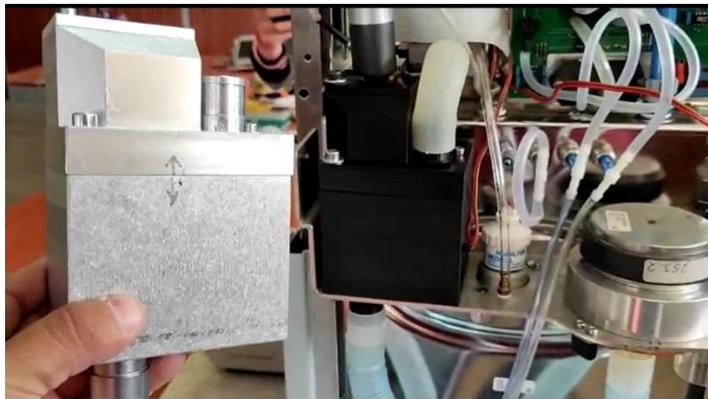


Figura 112

Bloque de válvulas de seguridad instalada.

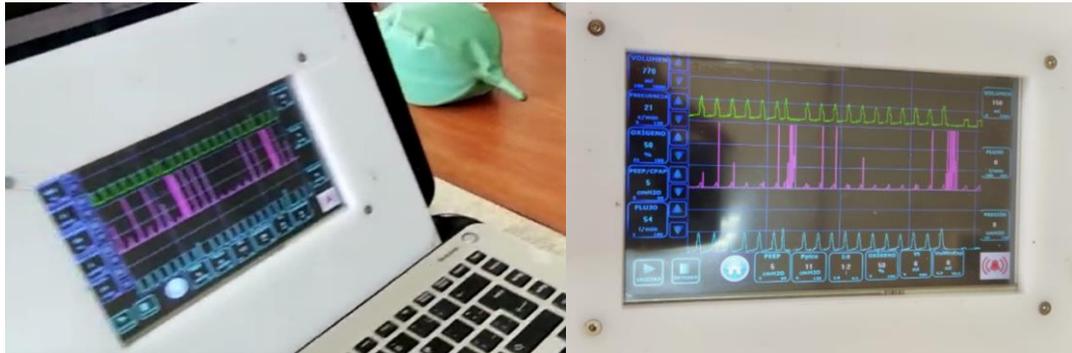


En conjunto con la señorita Katherine Méndez se realizaron las pruebas de funcionamiento, variando los parámetros de presión, flujo de entrada y frecuencia

respiratoria, donde se pudo evidenciar que el equipo funciono de manera adecuada con las válvulas impresas en PLA+. Esto se observó gracias a las gráficas de operación presentadas en la pantalla de control del equipo, proporcionado por nuestra compañera.

Figura 113

Panel de control respirador Hamilton Galileo.



Nota: Equipo perteneciente al trabajo realizado por la señorita Katherine Méndez.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE COSTOS Y FACTIBILIDAD

El análisis económico del presente proyecto contempla costos directos e indirectos, los cuales se detallan a continuación:

Costos directos

Se detallan los gastos en materiales y costos de fabricación del proyecto.

Tabla 6

Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas

Colaborador	Cargo	Horas	Costo hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. Santiago	Director del proyecto	70	20	1400
Castellanos, PhD				
Ing. Nicolás Páez,	Tutor del proyecto	30	20	600
PhD				
Fis. Henry López,	Co-Tutor del proyecto	30	20	600
PhD				
			Subtotal1	2600

Tabla 7

Remuneración a estudiantes.

Nombre	Cargo	Horas	Costo hora (USD)	Costo total (USD)
Sr. Jorge	Responsable del proyecto	480	2,5	1200
Rodríguez				

Nombre	Cargo	Horas	Costo hora (USD)	Costo total (USD)
Sr. Cristhian	Responsable del proyecto	480	2,5	1200
Luje			Subtotal2	2400

Tabla 8

Materiales y costo de fabricación incluido prototipos.

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
1	1	Plancha mdf 12mm	27	27
2	1	¼ Plancha de acrílico negro 9mm	80	80
3	1	Corte laser estructura en acrílico negro 9mm	60	60
4	1	Corte de base y complementos en material de acrílico de 5mm	22	22
5	1	Corte estructura en mdf 12mm	57	57
6	1	Corte dedos para brazos de aplastamiento	25	25
7	1	Corte de accesorios en acrílico 3mm	10	10
8	1	Corte de accesorios y soportes en 5mm	25	25
9	1	Acero inoxidable para brazos de aplastamiento 5mm	17	17
10	1	Corte de acero inoxidable para brazos de aplastamiento	30	30

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
11	1	Corte soportes para sin fin corona en acero AISI/SAE A36	60	60
12	2	PLA Pro+ para impresión en 3D	27	54
13	7	Rodamientos Koyo para eje de 10mm	2	14
14	2	Rodamientos Koyo para eje de 15mm	2.5	5
15	1	Elementos de sujeción Tabla 5	20.15	20.15
16	2	Cilindros de acero SAE 1020 1 pulgada	10	20
17	1	Duralón cilindro de 35mm	14.2	14.2
18	1	Caucho 15mm	11	11
19	1	Acople para motor/sin fin	20	20
20	5	Empaques	1	5
21	2	Ejes inoxidables 8mm	5.5	11
22	2	Rodamientos lineales 8mm	4.5	9
23	1	Herramientas varias (machuelos, brocas, etc.)	18	18
24	1	Tornillo sin fin corona y ejes 10mm	207	207
25	4	Resortes	2	8
26	1	Impresión 3D 30h costo por hora \$3 Válvulas	90	90
			Subtotal3	919.35

Nota: Las facturas se encuentran en el Anexo 2.

Tabla 9*Materiales y costo de fabricación equipo final.*

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
1	1	¼ Plancha de acrílico negro 9mm	80	80
2	1	Corte laser estructura en acrílico negro 9mm	60	60
3	1	Corte de base y complementos en material de acrílico de 5mm	22	22
4	1	Corte dedos para brazos de aplastamiento	25	25
5	1	Corte de accesorios en acrílico 3mm	10	10
6	1	Corte de accesorios y soportes en 5mm	25	25
7	1	Acero inoxidable para brazos de aplastamiento 5mm	17	17
8	1	Corte de acero inoxidable para brazos de aplastamiento	30	30
9	1	Corte soportes para sin fin corona en acero AISI/SAE A36	60	60
10	1	PLA Pro+ para impresión en 3D (medio rollo)	13.5	13.5
11	7	Rodamientos Koyo para eje de 10mm	2	14
12	2	Rodamientos Koyo para eje de 15mm	2.5	5
13	1	Elementos de sujeción	10	10
<i>Tabla 5</i>				
14	1	Caucho 15mm	11	11
15	1	Acople para motor/sin fin	20	20

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
16	2	Ejes inoxidables 8mm	5.5	11
17	2	Rodamientos lineales 8mm	4.5	9
18	1	Tornillo sin fin corona y ejes 10mm	207	207
			Subtotal	629.5

Tabla 10

Materiales y costo de fabricación válvulas.

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
1	1	PLA Pro+ para impresión en 3D	27	27
2	5	Empaques	1	5
3	4	Resortes	2	8
4	1	Impresión 3D 30h costo por hora \$3	90	90
			Subtotal	130

Total costos directos: Subtotal1 + Subtotal3

Total costos directos: 2600 + 939.35

Total costos directos: 3539.35

En la total de costos directos no se toma en cuenta la remuneración correspondiente a los responsables del proyecto.

Costos indirectos

Tabla 11

Costos indirectos.

Ítem	Descripción	Valor (USD)
1	Movilización	80
2	Material de oficina	20
3	Energía eléctrica	100
4	Comunicación	50
Total		250

El costo total del proyecto fue:

$$\text{Costo total} = \text{Costos directos} + \text{costos indirectos}$$

$$\text{Costo total} = 3539.35 + 250 = 3789.35 \text{ USD}$$

Tabla 12

Detalle de costos y financiamiento.

Tipo	Rubro	Valor (USD)	%	Observaciones
Costos Indirectos	Costos indirectos de la elaboración del proyecto	250	6.60	Costos durante la elaboración del proyecto y pruebas del mismo

Tipo	Rubro	Valor (USD)	%	Observaciones
Costos directos	Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas	2600	68.61	Corresponde a tutorías de docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas
	Impresión 3D en equipos de la Universidad de las Fuerzas Armadas	90	2.38	Rubro correspondiente a Impresión de elementos 3d y válvulas
	Aporte de los estudiantes responsables del proyecto	849.35	22.41	Correspondiente a la adquisición de materiales y fabricación
	Total	3789.35	100	

- La universidad de las Fuerzas Armadas tuvo una aportación del 70.99% del valor al proyecto correspondiente a tutorías e impresión de elementos en impresora 3D.
- La adquisición de materiales y fabricación de los mismos fue financiada por parte de los estudiantes a cargo del proyecto.

Análisis de Factibilidad

Tomando en cuenta el BOM (Bill of Materials) liberado por parte del MIT en el apartado de mecánica, podemos determinar un valor por costo de fabricación de alrededor de \$804.98, en la estructura del equipo como se puede encontrar en el Anexo 4, en el cuál se detallan los complementos del equipo y su costo individual. Como podemos observar en el análisis de costos directos independientes del prototipo final de este proyecto, el mismo se realizó con un costo total de \$629.5 contando con elementos encontrados en el mercado ecuatoriano, por lo que podemos determinar que se reduce el costo de fabricación por un monto de \$175.48.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

- Mediante el análisis de la geometría y funcionamiento de las válvulas pertenecientes al respirador Galileo, se establecieron dimensiones, características de forma y partes que componen el cuerpo de cada una. Estos parámetros permitieron generar un diseño en modelado 3D, que permitió verificar la geometría, el ensamble de sus componentes y la visualización de la trayectoria que sigue el fluido en el interior de las válvulas. Debido a que se contó con un presupuesto limitado y para sus pruebas de funcionamiento, el material de manufactura empleado en la construcción es PLA+.
- El proceso de construcción para las válvulas de seguridad se realizó mediante impresión 3D utilizando el polímero PLA+. Los parámetros de fabricación como el número de capas de impresión, velocidad de impresión, porcentaje de llenado, patrón de impresión, entre otros, resultaron ser adecuados para los elementos construidos, presentando un buen acabado geométrico y superficial.
- Se concluye que la geometría de las válvulas replicadas en este trabajo resultó ser adecuada, ya que una vez instaladas las válvulas en el equipo original y puesto en marcha, se pudo observar su correcto funcionamiento en distintos modos de operación, cambiando los parámetros de presión y frecuencia respiratoria.
- Al modelo de respirador emergente liberado por el MIT, se lo adaptó a un entorno local, conservando sus principales características y modo de funcionamiento. Para esto se requirió de un rediseño de la estructura, modificando ciertos elementos indispensables como por ejemplo los brazos de aplastamiento. Se realizaron cambios del diseño para implementar otros complementos como un sistema móvil para los apoyos del ambu, soportes para colocar los fines de carrera y sensor de

- posición, entre otros. Como resultado de esto se obtuvo una correcta construcción, ensamble, y operación del respirador emergente con bajos costos de manufactura sin comprometer su funcionalidad.
- Mediante la elaboración modelos de prueba en mdf e impresión 3D se evidenciaron problemas como falta de tolerancia en el proceso de corte, provocando fallas en el acople de los elementos, ruido producido por el movimiento del motor y la necesidad de implementar nuevos elementos a la estructura como perillas para accionamiento manual, nervios para soportes del ambu, entre otros. Esto nos permitió realizar las correcciones pertinentes y proceder con la construcción del equipo en los materiales planteados en el diseño. Esta estrategia nos permitió la reducción costos de fabricación producidos por el desperdicio de material bajo el costo de incrementar el tiempo de elaboración del equipo.
 - Durante las pruebas realizadas en el modelo final se evidenció un desgaste en el tornillo sin fin corona, por lo que fue necesario el desarrollo de un reservorio para lubricación continua. Una vez corregido esto y posteriormente con los ensayos realizados pudimos comprobar la funcionalidad del diseño planteado con diferentes parámetros de operación y durante diferentes intervalos de tiempo, además de esto no se presentó ningún fallo en la integridad de la estructura.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda fabricar las válvulas de seguridad en materiales adecuados para uso en equipos médicos con el fin de comprobar su resistencia, idoneidad, compatibilidad y compararlos con el material planteado en este proyecto.
- Es necesario establecer un protocolo de pruebas que permita definir los parámetros de operación y tiempos de ensayos para validación del equipo.
- Mejorar la adquisición de datos en lo referente a temperatura del motor y posición angular de los brazos, permitiendo así verificar la correcta operación del equipo.
- Realizar estudios comparativos entre un motor paso a paso y un servomotor en el uso de respiradores emergentes para determinar cuál de las dos opciones es la idónea para esta aplicación.
- Incentivar por parte de la Universidad a la continuación de esta línea de investigación, que involucra elementos de los campos médico, mecánico y electrónico, con la finalidad de desarrollar dispositivos médicos de calidad, bajo costo y que tengan un impacto positivo en el ámbito local.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceroscol. (2018). *Ficha técnica SAE40*. Cali: Aceroscol.
- Aegon. (2020). *Aegon*. Recuperado el 28 de 06 de 2021, de <https://blog.aegon.es/salud/respiradores-ventiladores-mecanicos/>
- Ambovent. (13 de 04 de 2020). *Ambovent*. Obtenido de Ambovent: <https://github.com/AmboVent-1690-108/AmboVent>
- Aula21. (2020). *Aula21*. Recuperado el 08 de 07 de 2021, de <https://www.cursosaula21.com/como-funciona-un-motor-electrico/>
- BIRTLH. (2015). *BIRTLH*. Recuperado el 06 de 07 de 2021, de https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/IG/IG03/es_PPFM_IG03_Contenidos/website_12_representacin_de_chaveteros.html#
- Borja, J. (1990). *Chavetas y Pasadores*. Servicio Nacional de Aprendizaje. Educar Editores S.A. Recuperado el 06 de 07 de 2021, de https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5730/dibujo_tecnico_chavetas_pasadores.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CLR. (2016). *Compañía Levantina de Reductores*. Recuperado el 03 de 07 de 2021, de <https://clr.es/blog/es/tipos-de-rodamientos-accionamientos/>
- Ferrocortes. (2008). *Ficha Técnica AISI8620*. Cali: Ferrocortes.
- FINUT. (29 de 12 de 2020). *Fundación Iberoamericana de Nutrición*. Recuperado el 27 de 06 de 2021, de <https://www.finut.org/manejo-nutricional-del-paciente-critico-hospitalizado-por-covid-19/>
- Fitch, B. (05 de 02 de 2016). *Noria Corporation*. Rusia: Machinery Lubrication.

- Hamilton. (30 de 09 de 2019). *Hamilton Medical*. Recuperado el 05 de 07 de 2021, de https://www.hamilton-medical.com/es_EC/Products/Accessories-and-Consumables/Breathing-circuits-and-components/Expiratory-valve-sets.html#:~:text=El%20conjunto%20de%20v%C3%A1lvula%20expiratoria,de%20cualquier%20sistema%20de%20ventilaci%C3%B3n.&text=Las%20p
- INEC. (2019). Recuperado el 17 de 07 de 2020, de Instituto Nacional de Estadísticas y Censos: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/camas-y-egresos-hospitalarios/>
- Israel, A. (13 de 04 de 2020). *Ambovent*. Obtenido de Ambovent: <https://members.smoove.io//view.ashx?message=h44741568012239274802196540122323322&r=1009>
- J.N. (03 de 05 de 2020). *Origen de una Hazaña: La opinión de Malaga*. Obtenido de La opinión de Malaga: <https://www.laopiniondemalaga.es/malaga/2020/05/03/historia-primer-respirador-andaluz-27560103.html>
- Koyo. (2019). *Catálogo de rodameintos rígidos de bolas*. Koyo. Recuperado el 10 de 06 de 2021, de <https://koyola.com.pa/catalogos/>
- Londin, P. (12 de 02 de 2018). *Pelandintecno*. Recuperado el 02 de 06 de 2021, de <https://pelandintecno.blogspot.com/2018/02/tornillo-sin-fin-descripcion-y.html>
- Londoño, J. F. (2012). *Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sin fin- corona*. Pereira-Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Massachusetts Institute of Technology. (03 de 2020). *MIT Emergency Ventilator*. Recuperado el 17 de 07 de 2020, de <https://emergency-vent.mit.edu/>
- Mayori, A. (2002). *Resistencia de Materiales Aplicada - 1ra Edición*. La Paz- Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.

- MecatrónicaLatam. (27 de 04 de 2021). *MecatrónicaLatam*. Recuperado el 08 de 07 de 2021, de <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/motor-paso-a-paso/>
- Medical, H. (2005). *GALILEO Service Manual including Maintenance, repairs and test PN 610207/05*. Switzerland: Hamilton Medical.
- Nacional, C. d. (2020). *Informe de Situación COVID-19 Ecuador, Informe No. 030*. Quito/ Ecuador.
- Naranjo, F. T. (2020). *EMERGENCY MECHANICAL VENTILATOR DESIGN IN ASSISTED/CONTROLLED AND SPONTANEOUS PRESSURE MODE*. Quito, Ecuador: Universidad Ciencia Y Tecnología. doi:<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.596>
- Newswire, G. (2020). *Medtronic share design specifications of Puritan 560*. Dublin: Globe Newswire.
- Nisbett, R. G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México D.F: Mc.Graw- Hill Interamericana.
- NSK. (2016). *NSK*. Recuperado el 03 de 07 de 2021 <https://www.nskamericas.com/es/services/what-s-a-bearing.html> de 07 de 2021
- PlanV. (19 de 03 de 2020). *PlanV*. Recuperado el 17 de 07 de 2020, de <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/duras-cifras-del-sistema-salud-ecuatoriano-ante-el-coronavirus-hay-1183-camas>
- Read, R. L. (29 de Abril de 2020). *INV PUB*. Obtenido de INV PUB: <https://www.pubinv.org/project/ventilator-verification-project/>
- Satelital, V. (2020). *Vía Satelital*. Recuperado el 28 de 06 de 2021, de https://viasatelital.com/proyectos_electronicos/proyectos006.php

Technology, M. I. (03 de 2020). *MIT Emergency Ventilator*. Recuperado el 17 de 07 de 2020, de <https://emergency-vent.mit.edu/>

Torres, M. (2010). *Xunta de Galicia*. Recuperado el 02 de 06 de 2021, de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/43_engranajes.html

Villalba. (04 de 04 de 2009). *Hervas Tecnología*. Recuperado el 02 de 06 de 2021, de <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/04/04-engranajes1.pdf>

Wailzager. (2000). *DIN 616 Rolling bears, general plan for boundary dimensions*. Alemania: Supersedes.

Wallace, A. (30 de 03 de 2020). *BBC NEWS*. Recuperado el 28 de 06 de 2021, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52060716>

ANEXOS