



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO DE 5 LITROS POR
MINUTO DE CAPACIDAD, PARA EL LABORATORIO DE
MANUFACTURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**

AUTOR: Paul Alexander Barragán Míguez

TUTOR: Ing. Mg. Jorge Enrique López Velástegui

AMBATO - ECUADOR

Septiembre – 2022

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema **“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO DE 5 LITROS POR MINUTO DE CAPACIDAD, PARA EL LABORATORIO DE MANUFACTURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, elaborado por el Sr. Paul Alexander Barragán Míguez, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 0202343190, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, septiembre 2022



Ing. Mg. Jorge Enrique López Velástegui

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Paul Alexander Barragán Míguez, con C.I. 0202343190 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Proyecto Técnico con el tema **“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO DE 5 LITROS POR MINUTO DE CAPACIDAD, PARA EL LABORATORIO DE MANUFACTURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, así como también los gráficos, análisis estadísticos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, septiembre 2022



Sr. Paúl Alexander Barragán Míguez

C.I.: 0202343190

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, septiembre 2022



Sr. Paúl Alexander Barragán Míguez

C.I.: 0202343190

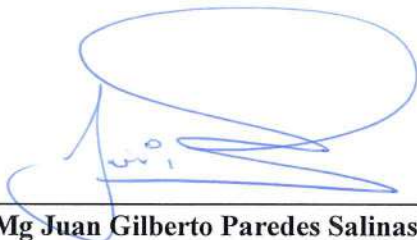
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Paul Alexander Barragán Míguez de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO DE 5 LITROS POR MINUTO DE CAPACIDAD, PARA EL LABORATORIO DE MANUFACTURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**.

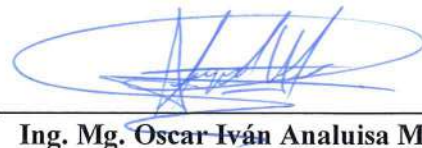
Ambato, septiembre 2022

Para constancia firman:



Ing. Mg Juan Gilberto Paredes Salinas

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Mg. Oscar Iván Analuisa Maiza

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento, su cariño, sus enseñanzas y todo su sacrificio para permitirme ser la persona que soy hoy en día.

A mi padre, por inculcar en mis valores como el respeto, la honestidad, la responsabilidad y saber brindarme consejos adecuados cuando más los necesite.

A los docentes de la Universidad Técnica de Ambato, por su paciencia al impartir el conocimiento que me servirá en el transcurso de mi vida profesional.

A mis compañeros, por mantener un ambiente competitivo y buscar la forma de siempre superarnos.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por permitirme tener el apoyo de mis padres en cada decisión para culminar con el desarrollo de la tesis.

A mis padres por todo su amor y sacrificio, permitiéndome estudiar de la mejor manera y sin necesidad. Gracias por enseñarme buenos valores, hacer de mi un hombre de bien y siempre darme su apoyo cuando más lo necesite.

Agradezco a la Universidad Técnica de Ambato, por permitirme ser parte de ella e instruirme en sus aulas, de igual forma a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos y apoyo para hacer de mi un buen profesional.

Al Ing. Jorge López por su paciencia y compromiso, guiándome en cada momento del desarrollo de la tesis con su conocimiento y durante toda la carrera.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
RESUMEN EJECUTIVO.....	xix
ABSTRACT	xx
CAPITULO 1	1
1 MARCO TEORICO	1
1.1 TEMA DEL PROYECTO TECNICO.....	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 MARCO TEORICO	3
1.3.1 OXIGENOTERAPIA	3
1.3.1.1 OXIGENOTERAPIA CONVENCIONAL	3
1.3.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....	9
1.3.2.1 OXÍGENO POR ELECTROLISIS DEL AGUA	9
1.3.2.2 OXÍGENO POR DESTILACIÓN FRACCIONADA.....	9
1.3.2.3 OXÍGENO POR SEPARACION DE GASES	10
1.3.2.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS CONCENTRADORES DE OXÍGENO	15
1.3.3 ETAPAS DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO.....	20

1.3.3.1	COMPRESIÓN DEL AIRE	20
1.3.3.2	PRETRATAMIENTO DEL AIRE	21
1.3.3.3	SEPARACIÓN DEL AIRE POR ADSORCIÓN	21
1.3.4	ALMACENAMIENTO DE OXÍGENO	22
1.3.4.1	DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO	22
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	OBJETIVO GENERAL	22
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
CAPITULO II		24
2	METODOLOGÍA	24
2.1	MATERIALES	24
2.2	MÉTODOS	26
2.2.1	INVESTIGACION BIBLIOGRÁFICA-DOCUMENTAL	26
2.2.2	INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA	26
2.2.3	INVESTIGACION DESCRIPTIVA	26
2.2.4	INVESTIGACION NUMERICA	27
2.2.4.1	PROGRAMAS	27
2.2.5	MÉTODOS Y TÉCNICAS	27
2.2.5.1	MÉTODO INDUCTIVO	27
2.2.5.2	MÉTODO DEDUCTIVO	28
2.2.5.3	MÉTODO ANALÍTICO	28
2.2.5.4	MÉTODO SINTÉTICO	28
2.2.5.5	METODO DE PROCESO DE DISEÑO	29
2.2.5.6	METODO DE PONDERACION LINEAL (SCORING)	30
CAPITULO III		34
3	ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34

ETAPA I: ESTUDIO DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE OXÍGENO DEL AIRE.	34
3.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DURANTE EL PROCESO PSA.....	34
3.1.1 PRIMERA ETAPA: PRESURIZACIÓN	34
3.1.2 SEGUNDA ETAPA: ALIMENTACIÓN	34
3.1.3 TERCERA ETAPA: ESCAPE	35
3.1.4 CUARTA ETAPA: PURGA	35
3.2 ANÁLISIS DEL TIPO DE ADSORBENTE A USAR.	37
3.3 PLANTEAMIENTO DEL DIAGRAMA DE PROCESOS DEL MODELO CONCENTRADOR DE OXÍGENO A REALIZAR.	38
ETAPA II: PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO CONCENTRADOR DE OXÍGENO.	40
3.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	40
3.5 MODIFICACIONES PLANTEADAS RESPECTO A CONCENTRADORES DE OXÍGENO COMERCIALES.	41
3.5.1 VÁLVULAS SOLENOIDES	41
3.5.2 TARJETA DE CONTROL.....	42
ETAPA III: SELECCIÓN Y DISEÑO DE COMPONENTES DE COMPONENTES.	46
3.6 SELECCIÓN DE COMPONENTES.	46
3.6.1 COMPRESOR	46
3.6.2 CONTROL Y MONITOREO DE RESULTADOS	49
3.6.2.1 FLUJÓMETRO	49
3.6.2.2 ANALIZADOR DE OXÍGENO	53
3.6.3 MOTOR A PASOS Y CAUDALÍMETRO CON CONO DE V.....	56
3.6.4 TUBO DE POLIVINILO	57
3.7 DISEÑO DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN.....	58

3.7.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	58
3.7.2	SELECCIÓN DE LA TUBERIA	59
3.7.3	DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN MEDIANTE SOFTWARE.....	64
3.7.3.1	SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN.....	65
ETAPA IV: AUTOMATIZACION Y CONTROL DEL SISTEMA.....		68
3.8	PROGRAMACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA.	68
3.8.1	CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN	68
3.8.2	CIRCUITO DE FUERZA	69
3.8.3	CIRCUITO DE REGULACIÓN DE CAUDAL.....	75
3.8.4	CIRCUITO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	77
3.9	CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR DE OXIGENO.....	79
3.10	COSTOS DE FABRICACIÓN.	79
ETAPA V: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL ESTUDIO REFERENTE A LA NORMA ISO 80601-2-69.		81
3.11	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	81
3.12	VALIDACIÓN DE DATOS DEL PROTOTIPO CONCENTRADOR DE OXÍGENO RESPECTO A LA NORMA ISO 80601-2-69.....	93
CAPITULO IV		94
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
4.1	CONCLUSIONES.....	94
4.2	RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA		97
5	ANEXOS	102
5.1	ANEXO A (Tabla de esfuerzo máximo permisible en tensión).....	102
5.2	ANEXO 2 (Programación ARDUINOS UNO).....	103

5.3	ANEXO C (Construcción).....	112
5.4	ANEXO D (toma de valores de concentración de oxígeno a distintos flujos) 116	
5.5	ANEXO E (Planos)	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema de Venturi en oxigenoterapia.....	5
Figura 2. Humidificador de burbuja.....	8
Figura 3. Humidificador caliente simple.....	8
Figura 4. Esquema de la electrolisis del agua.....	9
Figura 5. Esquema de destilación fraccionada del aire.....	10
Figura 6. Composición de gases en el aire.....	11
Figura 7. Esquema estándar de las proceso PSA.....	13
Figura 8. Proceso PSA de 4 y 3 etapas.....	14
Figura 9. Estructura de una zeolita con sus cargas.....	15
Figura 10. Esquema del concentrador de oxígeno.....	16
Figura 11. Esquema de las etapas de un compresor reciprocante.....	21
Figura 12. Filtro de aire de espuma para concentrador SYSMED M50.....	21
Figura 13: Válvula de bola.....	22
Figura 14: Válvula de cortina.....	22
Figura 15. Diagrama de flujo para elaborar un banco de pruebas concentrador de oxígeno.	29
Figura 16. Diagrama general del desarrollo del proyecto.....	30
Figura 17: Diagrama de procesos para el montaje del banco de pruebas.....	31
Figura 18. Esquema del PSA en un concentrador de oxígeno.....	33
Figura 19. Ciclo de Skarstrom de 4 etapas.....	36
Figura 20. XINTAO zeolita molecular 13X HP.....	37
Figura 21. Capacidad de adsorción de las zeolitas 13X y 5A.....	38
Figura 22. Diagrama del proceso PSA por el método Guerin-Dominé para concentración de oxígeno.....	39
Figura 23. Motor síncrono de 8 rpm.....	41
Figura 24. Válvula solenoide.....	42

Figura 25. Caudalímetro con cono de V.....	56
Figura 26. Motor a pasos28BYJ-48 y controlador ULN2003A.....	57
Figura 27. Tubo de vinilo transparente.....	58
Figura 28. Inogen One G4 columna de repuesto.....	59
Figura 29. Columnas de adsorción del banco de pruebas.....	65
Figura 30. Extremos de la columna de adsorción fijados.....	65
Figura 31. Aplicación de la presión interna máxima (30 psi) en el interior del cilindro.....	66
Figura 32. Mallado de la columna de adsorción.....	66
Figura 33. Tensiones máximas.....	67
Figura 34. Deformaciones unitarias.....	67
Figura 35. Factor de seguridad.....	68
Figura 36. Circuito de alimentación del sistema concentrador de oxígeno.....	69
Figura 37. Circuito de fuerza del concentrador de oxígeno.....	70
Figura 38. Conexión desde los relés al compresor, disipador de calor y válvulas solenoides.....	73
Figura 39. Grafica flujo (LPM) versus número de pasos del motor.....	75
Figura 40. Circuito de regulación de caudal.....	76
Figura 41. Circuito de recolección de datos.....	78
Figura 42. Banco de pruebas del equipo concentrador de oxígeno.....	79
Figura 43. Regresión con tendencia logarítmica con 1 lpm.....	82
Figura 44. Regresión con tendencia lineal con 1 lpm.....	82
Figura 45. Regresión con tendencia exponencial con 1 lpm.....	82
Figura 46. Regresión con tendencia logarítmica con 2 lpm.....	83
Figura 47. Regresión con tendencia lineal con 2 lpm.....	84
Figura 48. Regresión con tendencia exponencial con 2 lpm.....	84
Figura 49. Regresión con tendencia logarítmica con 3 lpm.....	85

Figura 50. Regresión con tendencia lineal con 3 lpm.....	86
Figura 51. Regresión con tendencia exponencial con 3 lpm.	86
Figura 52. Regresión con tendencia logarítmica con 4 lpm.	87
Figura 53. Regresión con tendencia lineal con 4 lpm.....	88
Figura 54. Regresión con tendencia exponencial con 4 lpm.	88
Figura 55. Regresión con tendencia logarítmica con 5 lpm.	89
Figura 56. Regresión con tendencia lineal con 5 lpm.....	90
Figura 57. Regresión con tendencia exponencial con 5 lpm.	90
Figura 58. Regresión con tendencia logarítmica para flujos de 1 hasta 5 lpm.	91
Figura 59. Regresión con tendencia lineal para flujos de 1 hasta 5 lpm.	92
Figura 60. Regresión con tendencia exponencial para flujos de 1 hasta 5 lpm.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre temperatura y Humedad Absoluta.	7
Tabla 2. Composición volumétrica aproximada del aire.	11
Tabla 3: Aplicaciones del PSA de acuerdo al absorbente.	14
Tabla 4: Listado de materiales.	24
Tabla 5. Especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno según la norma ISO 80601-2-69:2014	32
Tabla 6. Representación los símbolos del proceso de concentración de oxígeno.	32
Tabla 7. Características de la zeolita 13X XINTAO.	37
Tabla 8. Descripción de los símbolos utilizados en el esquema del proceso PSA para la concentración de oxígeno.	40
Tabla 9. Especificaciones técnicas válvula solenoide 3/4".	42
Tabla 10. Especificaciones de las tarjetas de control.	43
Tabla 11. Criterio de fácil adquisición en tarjetas de control.	44
Tabla 12. Criterios para ponderación de tarjetas de control.	44
Tabla 13. Minimización del criterio costo en tarjetas de control.	44
Tabla 14. Criterios y pesos de las tarjetas de control divididos por su total.	45
Tabla 15. Ponderación de la mejor alternativa en tarjetas de control.	45
Tabla 16. Características de los compresores.	46
Tabla 17. Criterio de fácil adquisición en compresores.	47
Tabla 18. Criterios para ponderación de compresores.	47
Tabla 19. Minimización de criterios como costo, potencia de entrada y nivel de ruido en compresores.	48
Tabla 20. Criterios y pesos divididos por su total.	48
Tabla 21. Ponderación de la mejor alternativa.	49
Tabla 22. Características de los flujómetros.	50
Tabla 23. Criterio de fácil adquisición en flujómetros.	50

Tabla 24. Criterios para ponderación de flujómetros.	51
Tabla 25. Minimización de criterios como costo y precisión en flujómetros.....	51
Tabla 26. Criterios y pesos divididos por su total.	52
Tabla 27. Ponderación de la mejor alternativa en flujómetros.	52
Tabla 28. Características de los analizadores de oxígeno.	53
Tabla 29. Criterio de fácil adquisición en analizadores de oxígeno.	54
Tabla 30. Criterios para ponderación de analizadores de oxígeno.	54
Tabla 31. Minimización de criterios como costo y precisión en analizadores de oxígeno.	55
Tabla 32. Criterios y pesos del analizador de oxígeno divididos por su total.	55
Tabla 33. Ponderación de la mejor alternativa en analizadores de oxígeno.....	56
Tabla 34. Especificaciones motor a pasos 28BYJ-48.....	57
Tabla 35. Especificaciones del tubo de polivinilo.....	58
Tabla 36. Dimensiones de una columna Inogen One G4.	59
Tabla 37: Catálogo de Extrusax para tubería de aluminio.....	61
Tabla 38. Características de las columnas de adsorción.....	64
Tabla 39. Disposición de los pines del Arduino UNO en el circuito de fuerza.....	71
Tabla 40. Relación del número de impulsos con el flujo resultante posterior al motor a pasos.	75
Tabla 41. Disposición de los pines del segundo Arduino en el circuito de regulación de caudal.....	76
Tabla 42. Disposición de los pines del Arduino UNO en el circuito de recolección de datos.....	78
Tabla 43. Costos de fabricación.	80
Tabla 44. Concentración de oxígeno a 1 LPM.	81
Tabla 45. Concentración de oxígeno a 2 LPM.	83
Tabla 46. Concentración de oxígeno a 3 LPM.	85

Tabla 47. Concentración de oxígeno a 4 LPM.	87
Tabla 48. Concentración de oxígeno a 5 LPM.	89
Tabla 49. Concentración de oxígeno a diferentes flujos del banco de pruebas de concentrador de oxígeno.....	91
Tabla 50. Validación de datos del banco de pruebas respecto a la norma ISO 80601-2-69.	93

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño y construcción de un concentrador de oxígeno de 5 litros por minuto, con el fin de proponer una alternativa a los tanques de oxígeno que obtuvieron una alta demanda entre el segundo semestre del año 2020 y primer semestre del 2021 a nivel nacional.

Primero se analizaron los procesos que envuelven a los concentradores de oxígeno comerciales mediante fichas técnicas, manuales, artículos científicos, normas (ISO 80601-2-69), etc., y complementarlo con investigación exploratoria en talleres de equipos electro-médicos para establecer alternativas de componentes como: compresor, tarjeta de control, flujómetro, analizador de oxígeno, etc., y hallar una opción viable mediante ponderación lineal (Scoring); o construirlo, como la columna de adsorción diseñada bajo el código ASME Sección VIII. Tomando de modelo el ciclo de Skarstrom de cuatro etapas y zeolita 13 x como adsorbente, se replicó las etapas de presurización, alimentación, escape y purga; empleando válvulas solenoides controladas mediante Arduino, un sensor de flujo en v controlado por un motor a pasos para suministrar oxígeno y un analizador de oxígeno VN202-MkII para comprobar la pureza del oxígeno a diferentes flujos. Datos que se reflejaron en una pantalla LCD.

Al final de este proceso se comprobó que las válvulas solenoides simulan perfectamente el ciclo de Skarstrom para generar oxígeno y analizando sus resultados, se verificó que el flujo y el grado de concentración de oxígeno tienen una relación inversamente proporcional, mientras el flujo sea menor más puro será el oxígeno suministrado.

Palabras Claves: Oxígeno, Válvulas solenoides, Ciclo de Skarstrom, Concentración de oxígeno, Scoring.

ABSTRACT

In this work, the design and construction of an oxygen concentrator of 5 liters per minute was carried out, in order to propose an alternative to the oxygen tanks that obtained a high demand between the second semester of 2020 and the first semester of 2021 at national level.

First, the processes involved in commercial oxygen concentrators were analyzed by means of technical data sheets, manuals, scientific articles, standards (ISO 80601-2-69), etc., and complemented with exploratory research in electro-medical equipment workshops to establish alternatives for components such as: compressor, control card, flowmeter, oxygen analyzer, etc., and to find a viable option by means of linear weighting (scoring), Taking as a model the four-stage Skarstrom cycle and 13 x zeolite as adsorbent, the pressurization, feed, exhaust and purge stages were replicated, using solenoid valves controlled by Arduino, a v-flow sensor controlled by a stepper motor to supply oxygen and a VN202-MkII oxygen analyzer to check the purity of oxygen at different flows. Data reflected on an LCD display.

At the end of this process it was verified that the solenoid valves perfectly simulate the Skarstrom cycle to generate oxygen and analyzing their results, it was verified that the flow and the degree of oxygen concentration have an inversely proportional relationship, the lower the flow the purer the oxygen supplied.

Key words: Oxygen, Solenoid valves, Skarstrom Cycle, Oxygen Concentration, Scoring.

CAPITULO 1

1 MARCO TEORICO

1.1 TEMA DEL PROYECTO TECNICO

“DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO DE 5 LITROS POR MINUTO DE CAPACIDAD, PARA EL LABORATORIO DE MANUFACTURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”

1.2 ANTECEDENTES

El oxígeno es un gas que conforma el 21 % de toda la atmosfera [1]. Varias empresas se dedican a procesarlo y purificarlo a gran escala, sin embargo, la mayor parte de este oxígeno es adquirido por empresas para fines industriales. Varias regiones del mundo carecen de infraestructura y tecnología que las grandes compañías de tratamiento de oxígeno poseen para su elaboración[2], por lo cual se recurre a la importación del gas medicinal para el tratamiento de enfermedades respiratorias.

Ciertas clínicas y hospitales cuentan con máquinas para purificar oxígeno a baja escala, pero son muy escasas, razón por la cual centros médicos de países menos desarrollados dependen de tanques de oxígeno, que son muy costosos y se han vuelto muy escasos en los países más afectados por el COVID-19[3]. Afectando también de forma directa a todo paciente que padezca de una enfermedad respiratoria que requiera oxígeno.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) [4] manifestó en febrero del 2021 se necesitaría de 1 600 millones de dólares para solventar la escases de oxígeno en alrededor de un año, tres meses más tarde ese valor estimado aumento hasta los 6 500 millones de dólares. A pesar de que esa cantidad de dinero no es tanta en comparación a lo gastado en vacunas o el apoyo financiero a negocios y trabajadores, “no se le ha dado prioridad suficiente” dijo Robert Matiru [4]director de administración del programa Unitaid, un grupo global que trabaja junto a la OMS.

Incluso mucho antes de la pandemia, varias de las regiones más pobres no eran aptas para poseer un suministro de oxígeno apropiado. A pesar de eso, no fue hasta que una grave escases de oxígeno afecto a países como Brasil o México, puesto que la falta de este gas

medicinal paso de un problema en potencia a una emergencia grave, momento en el cual la OMS hizo un llamado para aportar dinero a esta causa [4].

La OMS afirma que la demanda de oxígeno en algunos hospitales ha incrementado entre tres a cinco veces el primer semestre del 2021, esto debido al incremento de pacientes con enfermedades graves y críticas. También asegura que de cada cinco pacientes uno requerirá de oxígeno [3], esto debido a la afluencia de hipoxemia (bajo nivel de oxígeno en la sangre) provocada por la COVID-19.

A nivel regional la OMS [5] manifiesta que en febrero del 2021 uno de los países más afectados por la escases de oxígeno fue Brasil, que durante la segunda ola de la pandemia agoto las reservas de oxígeno en selvático estado de amazonas cuya demanda a mediados de enero rondaba los 76 000 metros cúbicos del gas medicinal, mientras las industrias proveedoras no superaban la producción de 28 200 metros cúbicos. El segundo país más afectado en la región fue Perú que registro un déficit de oxígeno aproximado de 257 000 metros cúbicos, que en mayo del mismo año sufrió un desabastecimiento tan grande de este gas, llegando a punto de ser declarado como “recurso estratégico” por parte del gobierno al disparar su precio en un 300 % en el mercado local [6].

En Ecuador también aumento la demanda de oxígeno, diario El Comercio [5] declaro que empresas como Glomedical vendía entre uno o dos tanques de oxígeno antes de la pandemia, mientras que en el primer semestre del 2021 se vendía hasta 15 tanques de oxígeno por día, incluso llegando al punto de quedarse sin unidades. También habla de Oxisalud, empresa que entregaba 1 200 cilindros únicamente en Quito y desde la emergencia sanitaria se entregaba 2 300 cilindros.

En Ecuador las cuatro grandes empresas dedicadas a la elaboración de oxígeno medicinal son: “Swissgas”, “Linde”, “Indura” y “Enox”. Siendo todas plantas guayaquileñas, a excepción de la última que tiene su planta en Quito; ciudades que distribuyen el gas medicinal a nivel nacional e internacional. Perú es el país al que más oxígeno medicinal exporta Ecuador, en el 2020 se exporto 1 709 toneladas métricas de este gas representando USD 1 millón. En 2021 exactamente entre enero y febrero se exporto 842 toneladas métricas a Perú equivalentes a USD 437 000, 20 toneladas métricas a Colombia y 0.04 toneladas métricas a Curazao [5].

A nivel nacional en el Ecuador la falta de oxígeno agravo la emergencia sanitaria, a pesar de contar con sus propias plantas industriales antes mencionadas, no se pudo satisfacer la

demanda nacional e internacional, siendo las provincias de Loja, Azuay y Santo Domingo de los Tsáchilas las más afectadas por la escasez y precios elevados [2]. Con esta saturación en centros de salud se recomendó a personas con estados de salud no muy graves ser tratados en casa, haciendo cada vez más escaso y costoso al oxígeno medicinal.

Para ayudar a solventar la escases de oxígeno, el presente proyecto plantea diseñar un concentrador de oxígeno, dispositivo el cual funciona tomando aire del ambiente y mediante PSA (adsorción por variación de presión) puede filtrar el oxígeno del aire, opción con la cual se puede obtener un suministro de gas medicinal de forma ilimitada, mientras se disponga de aire, un suministro de energía y un mantenimiento adecuado. Ofrece varias ventajas frente a los convencionales: la autonomía previamente mencionada; haciendo ilimitado al concentrador respecto a un tanque de oxígeno, brinda más seguridad; elaborando oxígeno al momento que la máquina trabaja y no retiene oxígeno a presión que es peligroso en caso fugas [7].

1.3 MARCO TEORICO

1.3.1 OXIGENOTERAPIA

El oxígeno medicinal se consigue primordialmente del aire ambiental mediante procesos de destilación fraccionada y se envasa como oxígeno líquido o gaseoso. Desde un punto de vista técnico, es necesario comprender las características de este gas para manipularlo adecuadamente ya que su proceso es complejo[8]. De igual forma en el ámbito clínico, se debe comprender los sistemas de administración de oxigenoterapia convencional, debido a que tiene un amplio rango de aplicaciones.

La principal forma de aplicación es la oxigenoterapia mediante cánula nasal de alto flujo, este método posee varias ventajas sobre la oxigenoterapia convencional , principalmente en el lavado del espacio muerto anatómico, aplicación con bajos niveles de presión de distensión, que aunque sean bajos brindan presión positiva, reducen el trabajo metabólico y respiratorio en el proceso de inspiración del gas, esto gracias a la humidificación y temperatura que son similares a los requeridos por el organismo [8].

1.3.1.1 OXIGENOTERAPIA CONVENCIONAL

Cualquiera sea la forma de proveer de oxígeno (Cilindro, concentrador u oxígeno líquido), se lo puede administrar mediante dos sistemas, los cuales se los considera por sus referencias clínicas y físicas:

- Sistema de alto flujo: Suministran totalmente la atmosfera que inspira el paciente, de manera que proporciona el total del caudal volumétrico.
- Sistema de bajo flujo: Suministran una porción de la atmosfera que inspira el paciente, explicado de otra forma, el sistema aporta con una fracción del caudal volumétrico inspirado, mientras que la otra fracción se la toma del ambiente.

Se debe tomar en cuenta esta diferencia y no referenciarla a la concentración de oxígeno que proporciona, sino más bien a la cantidad de oxígeno que suministra, como una fracción del volumen total entregado. El FiO_2 hace referencia a la fracción inspirada de oxígeno, se lo utiliza en el ámbito clínico para referirse a la concentración de gas en la mezcla que inspira el paciente y se suele expresar en decimales, como ejemplo un FiO_2 de 0.5 representa una concentración del 50 % [8].

SISTEMAS DE BAJO FLUJO

Estos sistemas son los más usados ya que provienen de una fuente de gas y su administración se controla mediante un flujómetro, su FiO_2 es desconocida ya que depende de los siguientes factores.

- 1. Flujo de O_2 suministrado:** El FiO_2 es proporcional al flujo, aumenta a mayor flujo y disminuye a menor flujo. Por lo cual se afirma que “un sistema de bajo flujo es flujo dependiente, aunque se vea afectada por otros factores” [8], de manera que al suministrar 5 litros por minuto se obtendrá más FiO_2 que al hacerlo con 1 litro por minuto.
- 2. Tamaño de reservorio anatómico o mecánico:** “Mientras el paciente se encuentre conectado a un sistema de bajo flujo, este reservorio anatómico será igual a una tercera parte del espacio muerto anatómico” [8], que está ocupado por O_2 al 100 %, al ser un suministro continuo. Siendo así, durante la inspiración, el volumen de gas llevado hacia los alveolos es igual a la suma del volumen inspirado del ambiente y el volumen contenido en el depósito anatómico. Para esto, la FiO_2 varía en relación con el volumen del reservorio de esta forma:

Deposito grande = mayor FiO_2

Deposito pequeño= menor FiO_2

- 3. Patrón respiratorio del paciente:** La FiO_2 presenta modificaciones que dependen de la mezcla de 2 volúmenes diferentes con diferentes concentraciones de oxígeno, el volumen que es suministrado por el sistema con FiO_2 de 1 y el

volumen minuto (V') que es el producto de la frecuencia respiratoria (FR) y el volumen corriente (VT), que se usa para fines experimentales al ser el V' y la FiO_2 inversamente proporcionales en este tipo de sistemas [8].

SISTEMAS DE ALTO FLUJO

Como se mencionó anteriormente estos sistemas son capaces de suministrar toda la atmosfera inspirada por el usuario, esto gracias al adaptador de Venturi que se encarga de succionar, mezclar y acelerar los gases.

En el siglo XVIII Bernoulli describió un principio de la hidrodinámica, en el cual explica como un fluido es capaz de incrementar su velocidad mediante la construcción de un ducto y además que la presión lateral del fluido disminuye, en consecuencia, del aumento de velocidad [8]. Venturi en base en este principio en el siglo XIX describe la tobera de conos divergentes, que sirvió para varios avances tecnológicos construyendo dispositivos capaces de generar e incrementar flujos de forma significativa mediante mecanismos físico-mecánicos.

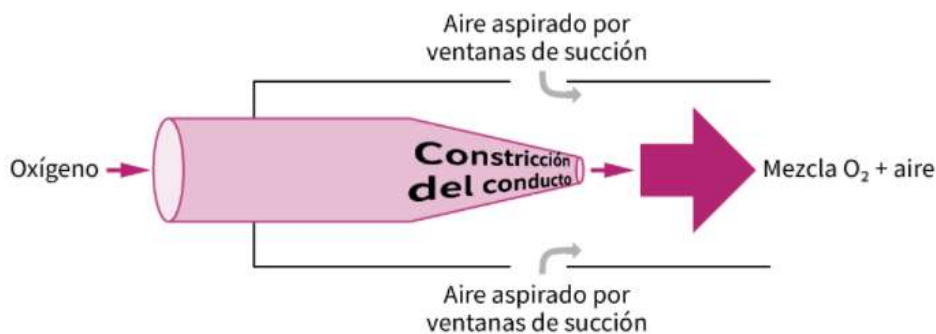


Figura 1. Esquema del sistema de Venturi en oxigenoterapia [8].

Funcionamiento del Venturi

El flujómetro regula el caudal que atraviesa una manguera lisa previo al ingreso en el Venturi (Figura 1), donde una constricción regulable provocara varios efectos:

- 1) Aceleración de flujo: Con flujo constante, la aceleración provocara un medio con presión subambiental.
- 2) Succión de gas: Al aumentar la velocidad en el flujo, la presión en la periferia del fluido baja.
- 3) Mezcla de gases: Se combina el oxígeno con el aire ambiental, donde sus concentraciones son de un 100 % y de 21 % respectivamente.

Como producto de la combinación de estos gases y dependiendo del aire ambiental se obtiene la FiO_2 que succionará el sistema. También dependerá del diseño del adaptador de Venturi que puede ser de constricción fija o con ventana de succión fija [8].

Al usar correctamente un sistema de alto flujo sus ventajas más importantes son:

- Cumple con el flujo máximo requerido por el paciente.
- Proporciona la totalidad de la atmosfera inspirada.
- Brinda complemente la atmosfera inspirada.
- Asegura una FiO_2 constante y conocida.
- Un valor conocido de la FiO_2 y con suministración constante.
- Variables confiables al momento de calcular valores que involucren la FiO_2 .
- Obtiene adecuada humidificación por parte de los gases inspirados, esto gracias a que una parte del volumen lo suministra el ambiente.
- Permite calentar gases luego de ser inspirados.
- El patrón respiratorio del cliente no define la FiO_2 .

Sus únicas desventajas son su elevado costo respecto a los de bajo flujo y la incomodidad del equipo a usar sobre el rostro.

Los dispositivos de acople más usados para el sistema de alto flujo al paciente son:

- Mascara de aerosol.
- Tienda facial.
- Mascara de traqueostomía.
- Adaptador de Briggs (pieza en T).

HUMIDIFICACIÓN DEL OXÍGENO INSPIRADO

Regular la temperatura y la humidificación de los gases inspirados son fenómenos relacionados ya que el uno depende del otro. La Vía Aérea Superior (VAS) se encarga de calentar el aire frío o de enfriar el aire caliente.

Se conoce como Humedad Absoluta (HA) a la capacidad de un gas para contener vapor de agua a cierta temperatura [10], mientras que la proporción del contenido de agua presente en el gas y su poder de retención de agua por ese gas a cierta temperatura se conoce como Humedad Relativa (HR):

$$\%HR = \left(\frac{\text{contenido actual}}{\text{capacidad}} \right) * 100 \quad (1.1)$$

La HA es proporcional a la temperatura, a medida que aumenta la temperatura también aumenta la HA (ver Tabla 1). Los alveolos soportan aire a temperatura de 37 °C (corporal) y 100 % HR. Estas condiciones se denominan Limite de Saturación Isotérmica (LSI), este punto puede desplazarse hacia arriba o debajo de acuerdo con las condiciones ambientales o clínicas subyacentes. Inhalar gases secos y fríos en oxigenoterapia puede desplazar el LSI hacia abajo, incluso a los mismos alveolos, a condiciones adversas.

Tabla 1. Relación entre temperatura y Humedad Absoluta [10].

Temperatura (°C)	Humedad Absoluta (mg H2O/litro)
0	5
10	9
20	17
30	30
37	44
40	51

Todo paciente que reciba O₂ suplementario, debe ubicar entre la fuente del gas y el paciente un sistema de humidificación, esto debido a que se puede generar peligros estructurales, fisiológicos y clínicos severos, los cuales pueden agravar la mejora del paciente.

Tipos de humidificadores

- **Humidificador de inmersión o de burbuja**

Es el sistema de humidificación más usado en oxigenoterapia (Figura 2). El gas se moviliza por debajo del líquido de humidificación (agua destilada o estéril) mediante un tubo sumergido, donde sale al agua por medio de pequeños orificios que se encuentran en el extremo distal del tubo de conducción, generando burbujas de acuerdo con el número de orificios. Cada burbuja entra en contacto con el agua hasta poder escapar y el gas humidificador llega hasta el paciente [8]. Por su versatilidad y bajo coste son los modificadores más usados. Para prevenir la sobrepresión en el recipiente poseen una válvula de sobrepresión que se abre cuando el flujo es muy elevado para el sistema.

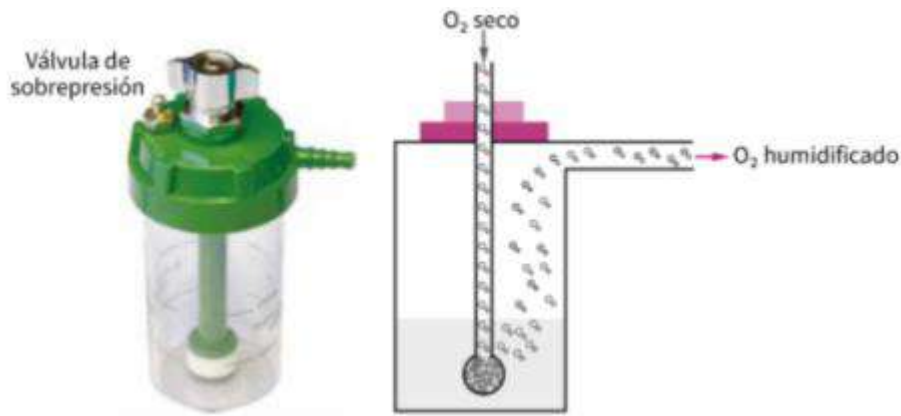


Figura 2. Humidificador de burbuja [8].

- **Humidificador caliente simple o de contacto**

El porcentaje de HR se puede reducir mediante el calentamiento del líquido, y por tanto del gas que se suministrara al paciente. Favoreciendo la capacidad del gas de trasportar vapor de agua mientras pasa por el humidificador térmico. Se lo usa de preferencia cuando se suministra oxígeno con cánula nasal de alto flujo.



Figura 3. Humidificador caliente simple [8].

- **Nebulizadores como humidificadores**

Con frecuencia se utiliza nebulizadores jet como reemplazo a los humidificadores en pacientes que reciben oxigenoterapia. Sin embargo, los nebulizadores generan partículas de agua y no vapor de agua que se necesita en oxigenoterapia. El diámetro de estas partículas ronda entre 0.5 y 40 micras dependiendo del nebulizador, mientras que las partículas de vapor de agua rondan los 0.00001 micras y pueden causar bloqueos en pequeñas vías desmejorando la oxigenación, razón por la cual no se recomienda.

1.3.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

El oxígeno es el gas que da paso a la vida. En condiciones normales al ser inspirado del medio ambiente se estima que posee una concentración estable del 21 % producto del proceso de fotosíntesis de las plantas. En condiciones de requerimientos mayores al 21 % se suele utilizar métodos artificiales, destacándose la electrolisis del agua, destilación fraccionada y la separación de gases [8].

1.3.2.1 OXÍGENO POR ELECTROLISIS DEL AGUA

Es un proceso electroquímico donde la energía eléctrica es la que impulsa a formar reacciones químicas. Se conoce que el agua se descompone en oxígeno e hidrógeno y al momento de transitar una corriente en presencia de electrolitos, esta corriente descompone los iones de H_2 con carga positiva que se desplazan al cátodo de carga negativa, donde se reducen hasta formar átomos de H_2 que se combinan hasta formar hidrógeno gaseoso. Por su parte el O_2 se forma en el ánodo cargado positivamente ver Figura 4. El campo de aplicación común de la electrolisis para proveer O_2 esta en submarinos o naves espaciales.

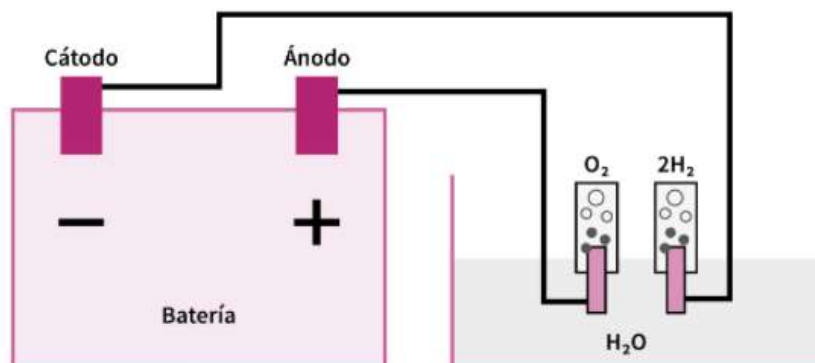


Figura 4. Esquema de la electrolisis del agua [8].

1.3.2.2 OXÍGENO POR DESTILACIÓN FRACCIONADA

Este método se utiliza para la separación de mezclas homogéneas con diferentes puntos de ebullición, como ejemplo se puede tomar a los líquidos miscibles (propiedad de ciertos líquidos para mezclarse y formar una nueva disolución) [8].

El proceso de obtención de los componentes del aire supone un método industrial mucho más complejo pero fácil de entender si se analiza la secuencia de eventos que interviene en la Figura 5.

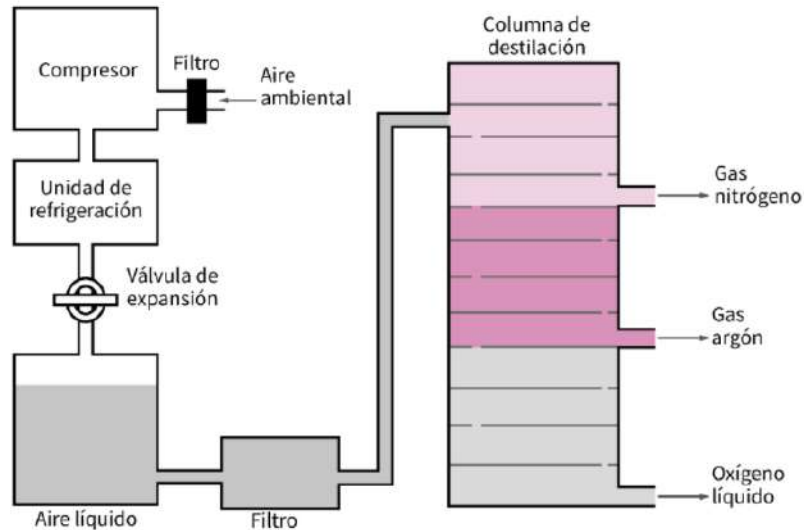


Figura 5. Esquema de destilación fraccionada del aire [8].

- Se encausa aire del ambiente por un filtro para limpiar el aire de cualquier impureza.
- En uno o varios compresores se comprime al gas.
- Una válvula de expansión retiene al gas comprimido en una unidad de refrigeración.
- El aire gaseoso se convierte en líquido por licuefacción, resultado de estar expuesto a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- El aire pasa a la columna donde se fraccionan sus componentes gracias a sus diferentes puntos de ebullición ($\text{N}_2 = -195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_2 = -183\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Ar} = -185.8\text{ }^{\circ}\text{C}$), dando como resultado oxígeno líquido y nitrógeno y argón gaseoso.

1.3.2.3 OXÍGENO POR SEPARACION DE GASES

La separación de gases se refiere a uno o varios procesos empleados para separar gases, en los cuales por lo general se busca obtener un producto purificado. Un ejemplo de mezcla de gases es el aire, cuya composición es: nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrogeno y gases nobles, que se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición volumétrica aproximada del aire [9].

Componente	Símbolo Químico	% en el aire
Nitrógeno	N	78.05
Oxígeno	O	20.95
Argón	Ar	0.934
Dióxido de carbono	CO ₂	0.035
Neón	Ne	0.001818
Helio	He	0.00052
Kriptón	Kr	0.000110
Xenón	Xe	0.000006
Hidrogeno	He	0.00005
Metano	CH ₄	0.00017
Óxido nitroso	N ₂ O	0.00005
Vapor de agua	H ₂ O	Variable
Ozono	O ₃	Variable
Partículas	-	Variable

La Figura 6 ilustra de mejor manera la composición del aire:

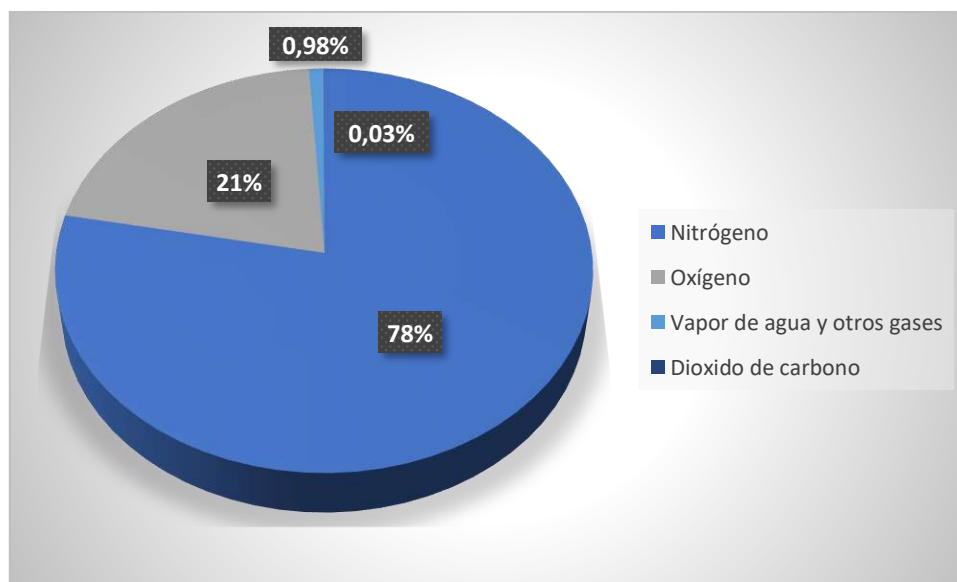


Figura 6. Composición de gases en el aire [9].

Los gases mencionados anteriormente poseen diferentes propiedades tanto físicas como químicas, por lo cual es posible separarlos. La purificación de cualquiera de estos gases se puede llevar a cabo con varios métodos, entre los cuales

destaca: separación a bajas temperaturas, separación por membrana y separación por adsorción[9].

SEPARACIÓN CRIOGÉNICA

Es un proceso que da como resultado una gran cantidad de gases o líquidos de alta pureza. Se fundamenta en los distintos puntos de ebullición que tienen los gases que constituyen al aire, junto con la manipulación de parámetros como temperatura y presión.

Los procesos para separación criogénica son la compresión del aire, purificación, enfriamiento, destilación y compresión del producto [10]. Es un método que requiere una cantidad enorme de energía para funcionar. Este proceso es económicamente viable únicamente para el argón, puesto que su composición de menos del 1 % del aire y viene siendo un subproducto de plantas de oxígeno de alta pureza.

SEPARACIÓN POR MEMBRANA

La separación por membrana es un método caracterizado por ser uno de los más compactos y ligeros, su diseño modular es de poco mantenimiento, consumo de energía, costo y amigable con el ambiente.

El principio de este método radica en las diferentes tasas de permeabilidad que tienen los gases al pasar por una película de polímero. Un ejemplo es el oxígeno (más vapor de agua y dióxido de carbono), que tiene a capacidad de propagarse más rápido a través de los tubos que gases como el nitrógeno o el argón. Esta difusión se vale de los “gases rápidos y gases lentos”, para a partir del aire producir gases inertes, principalmente argón y nitrógeno, teniendo como desecho un gas enriquecido en oxígeno [10]. El problema con el método de separación de membrana es la gran área superficial que emplea, algunas membranas cerámicas ocupan menos espacio, pero requieren una mayor corriente eléctrica lo cual lo convierte en problema de seguridad por la corriente y calor que produce.

SEPARACIÓN POR ADSORCIÓN

La separación por adsorción es un método de separación que se caracteriza por la retención de componentes en la superficie porosa de un sólido. Esta adsorción se produce por la interacción entre un adsorbato y un adsorbente, que puede ser física o química. Es un método muy práctico en procesos de purificación de efluentes. Su principal ventaja es la de conservar las propiedades físicas de los componentes, respecto a otros métodos [10]. Dentro de los procesos de las tecnologías de separación por adsorción se puede encontrar:

- PSA (Adsorción por variación de presión): El adsorbente se recupera al reducir la presión.
- VSA (Adsorción con variación de vacío): El adsorbente se regenera al estar bajo una presión por debajo de la atmosférica.
- TSA (Adsorción con variación de temperatura): El adsorbente se regenera al incrementar su temperatura.
- ESA (Adsorción con calentamiento por corriente eléctrica): el adsorbente se regenera al entrar en contacto con una corriente de bajo voltaje.

Adsorción por variación de presión

Es un proceso de separación selectiva, el cual permite separar uno o varios componentes dentro de un flujo de alimentación heterogéneo. Este proceso de separación cuenta con dos etapas elementales, que son la adsorción y la regeneración. Durante la adsorción, un flujo de gas atmosférico proveniente de un compresor, entra a un tanque con adsorbentes (zeolitas en la mayoría de los casos), donde se retira componentes no deseados del flujo (en este caso nitrógeno) para dar libre paso al oxígeno [7]. Posterior en la regeneración se despresuriza el tanque con adsorbentes liberando los componentes no deseados, como se detalla en el esquema de la Figura 7.

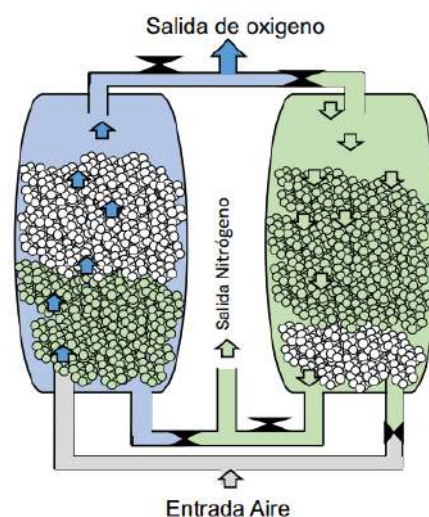


Figura 7. Esquema estándar de las proceso PSA [11].

El ciclo de adsorción por variación de presión en dos camas fue desarrollado por Skarstrom en 1960 [10], el cual estableció un ciclo de 3 etapas (Figura 8) que constan de: presurización, alimentación y despresurización. También elaboró un ciclo de 4 etapas

(Figura 8) que constan de presurización, alimentación, escape y purga, siendo este último una versión mejorada del primer ciclo.

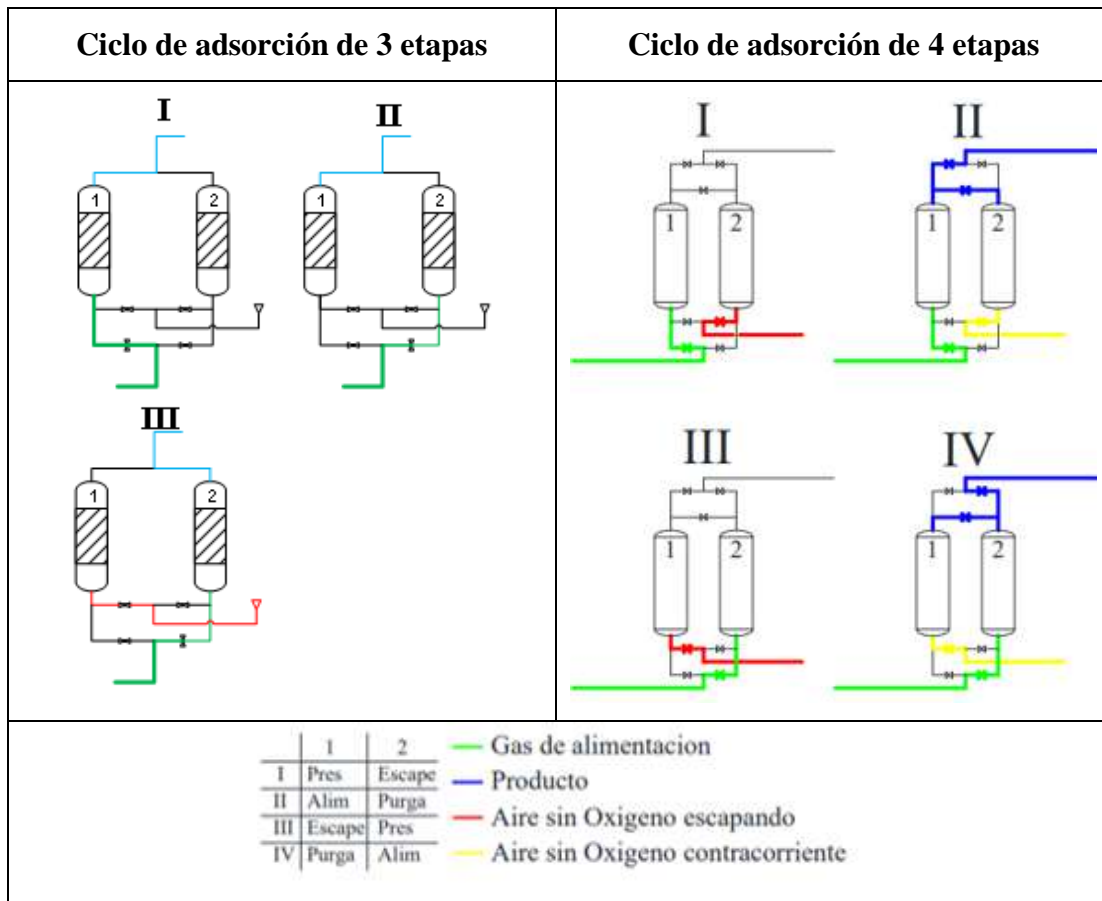


Figura 8. Proceso PSA de 4 y 3 etapas [10].

La Tabla 3 especifica los productos que se puede obtener al aplicar un proceso PSA según el adsorbente que se emplee:

Tabla 3: Aplicaciones del PSA de acuerdo al adsorbente [11].

Adsorbente	Producto	Proceso	Sistema
Carbón activado o zeolita	H ₂ de alta pureza	Refinamiento a partir de combustibles	Multi columnas
Alúmina activada	Aire seco	Secado	Doble columna
Zeolita 5a-13x	O ₂ (+Ar)	Separación de aire	Doble columna
Tamiz molecular de carbono o zeolita	N ₂ (+Ar)	Separación de aire	Doble columna
Tamiz molecular de carbono	N ₂ + O ₂	Separación de aire	Doble columna
Tamiz molecular de carbono	CO ₂ + CH ₂	Separación de gas de vertederos	Oscilación de vacío

ZEOLITA

Las zeolita naturales son rocas sedimentarias, las cuales se forman de la reacción entre procesos volcánicos y aguas salinas a través del tiempo [12]. Este aluminosilicato cristalino posee una estructura en forma de panel, que está lleno de canales y microporos que a su vez se componen de tetraedros TO_4 ($T=Si, Al$) Figura 9 , junto a átomos de oxígeno que conectan a los tetraedros entre sí [13], permitiendo una gran variedad de tipos de zeolitas, esto gracias a que los átomos de silicio o aluminio se rodean de cuatro átomos de oxígeno, lo que permite formar tetraedros y sumarlos por celda unitaria, creando estructuras tridimensionales dando lugar a varias clases de zeolita.

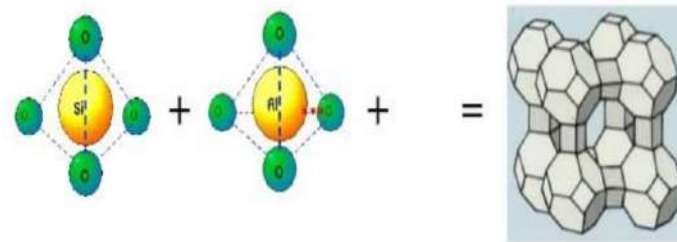
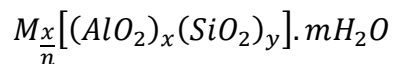


Figura 9. Estructura de una zeolita con sus cargas [14].

Las cavidades porosas contienen cationes metálicos los cuales son eliminables y reemplazables, su fórmula general es:



Donde M es el catión metálico, que se excluye de la estructura cristalina; x e y son la proporción de tetraedros de silicio y aluminio, mientras m se refiere a la cantidad de moléculas de agua en la estructura cristalina [14].

1.3.2.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS CONCENTRADORES DE OXÍGENO

Estos dispositivos médicos autónomos se alimentan por electricidad y están diseñados para concentrar oxígeno del ambiente atmosférico [7]. Funcionan gracias al proceso de adsorción por variación de presión, mediante el cual se puede llegar a concentraciones de hasta un 95.5 % de pureza después de pasar por varios filtros, tamices y otros procesos para posterior ser liberado de forma continua y dosificada, con un flujo determinado (Figura 10).

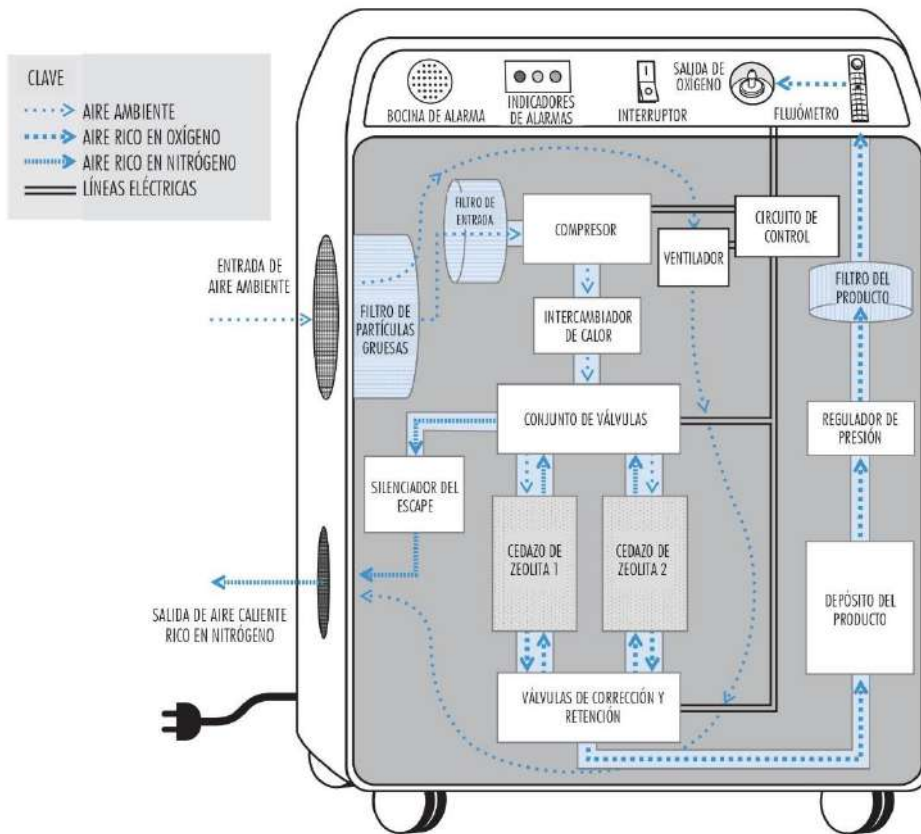


Figura 10. Esquema del concentrador de oxígeno [7].

Generalmente existe dos tipos de concentradores de oxígeno, los de tipo estacionario y los portátiles. La mayoría de los estacionarios tienen un peso menor a los 27 kg y poseen ruedas para una mejor movilidad, son capaces de proporcionar hasta 10 lpm e incluso proporcionar flujos de 0.1 lpm gracias a sus accesorios. Un concentrador de oxígeno adecuado para establecimientos médicos debe ser capaz de brindar hasta 5 lpm, funcionar con corriente alterna (CA). Por otra parte, los concentradores portátiles limitan su capacidad hasta los 3 lpm o menos, consumen menos energía que los modelos anteriores, sin embargo, su uso no es apropiado en varios pacientes [7]. La mayoría de los concentradores portátiles funcionan con baterías, además cuentan con dispositivos que permite administrar oxígeno únicamente en la inspiración. Este flujo se conoce como intermitente, permite ahorrar oxígeno y energía eléctrica.

La norma ISO 80601-2-69:2014 de “Medical Electrical Equipment” establece los requisitos para los concentradores de oxígeno estacionarios, estas especificaciones establecen una presión estándar en seco (STDP) de 101.3 kPa y una temperatura de operación de 20 °C en seco. Estos parámetros son recomendados por la Organización Mundial de la Salud, basándose en la ISO 80601-2-69, la cual establece rangos de las

variables del concentrador tales como: concentración del oxígeno, control de flujos, alarmas, salidas, caja, corriente eléctrica, entre otros, tal como se establece en [7].

CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO

El dispositivo deberá ser capaz de proporcionar un flujo continuo de oxígeno, cuya concentración sea mayor al 82 %. La concentración mínima de oxígeno debe mantenerse a la tasa de flujo máxima establecida, “con un 95 % de humedad relativa a 40 °C y presión atmosférica igual a una altura de 2 000 metros sobre el nivel del mar” [7].

Observaciones

- El porcentaje de concentración de oxígeno es equivalente a la pureza del oxígeno.
- Los dispositivos concentradores de oxígeno comerciales producen un oxígeno concentrado entre 82 y 96 %.
- Es importante someter al concentrador a varias pruebas simultáneamente en condiciones de humedad relativa y temperatura, pues su concentración de oxígeno se puede ver afectada y reducida por la humedad relativa.

CONTROL DE FLUJO

Los concentradores deberán estar equipados al menos con un flujómetro integrado con control de la tasa de flujo. En el caso de poseer varios flujómetros, cada uno debe contar con su respectivo control de tasa de flujo.

En uso pediátrico, el flujómetro deberá como mínimo suministrar una tasa de flujo de 0.5 lpm. Esta tasa también depende de las necesidades de oxígeno.

Evitar usar concentradores de oxígeno que superen una suministración de tasa de flujo mayor a la máxima establecida.

El flujómetro deberá brindar un control continuo en la tasa de flujo, sus marcas deberán ir desde 0 lpm hasta la tasa de flujo máxima, de preferencia con intervalos mínimos de 0.5 lpm [7]. El concentrador deberá generar como mínimo 55 kPa con todos sus flujos, hasta la tasa de flujo máxima establecida.

Observaciones

- Dispositivos de 8 o 10 lpm solo pueden suministrar un flujo mínimo de hasta 2 lpm. En caso de requerir flujos menores, se deberá emplear otros dispositivos.

- El tener una tasa de flujo mayor a la que establece el fabricante podrá afectar al desempeño de los tamices, bajando el grado de concentración de oxígeno. O en el peor de los casos cambiar de tamices con mucha frecuencia.

INDICADORES Y ALARMAS

Un monitor de oxígeno deberá indicar cuando la concentración de oxígeno sea menor al 82 %.

Incorporará alarmas en el caso de existir fallas como:

- Concentración de oxígeno menor al 82 %.
- Interrupción del flujo.
- Presión alta o baja.
- Batería baja.
- Corte de luz.
- Temperatura elevada.

Observaciones

- Las alarmas indicaran cuando el concentrador necesite mantenimiento. Por lo genera el cambio de filtro de partículas gruesas o la obstrucción del flujo.
- De acuerdo con el modelo del concentrador se puede usar diferentes nombres para los mismos componentes [7].

SALIDAS

Debe existir una salida de oxígeno que pueda acoplarse directamente a la tubería donde se administrara el gas.

Las salidas será boquillas dentadas, empotradas y serán de materiales que no se deformen fácilmente.

CAJA

Estos dispositivos deberán contar con filtros de partículas gruesas, con la finalidad de evitar polvo o suciedad dentro de la caja, dejando una entrada libre de aire.

Todos los filtros extraíbles del dispositivo deberán ser de fácil limpieza.

Se recomienda una caja con ruedas para la fácil movilidad entre habitaciones.

El ruido producido por el concentrador de oxígeno no deberá ser superior a los 50 dB (A), mientras esté funcionando.

CORRIENTE ELÉCTRICA

La eficiencia de la fuente de alimentación del concentrador de oxígeno debe ser menor o igual a 70 W en cada lpm[7].

El dispositivo debe poseer un enchufe macho compatible con las tomas de corriente de acuerdo con el país y establecimiento donde funcionara.

Observaciones

- Los concentradores estacionarios consumen una mayor cantidad de energía eléctrica (entre 300 y 600 W), representando una alta demanda en caso de uso continuo.
- Los requisitos de consumo eléctrico deberán inscribirse en el dispositivo, puesto que los concentradores se construyen para diferentes voltajes y frecuencias.

CONSIDERACIONES DETERMINADAS POR EL ENTORNO

Flujo de salida máximo

Los concentradores son elaborados de forma comercial con capacidades de 3, 5, 8 y 10 lpm cuyo flujo máximo a suministrar se determina a partir de una evaluación de demanda de oxígeno. Por lo general un dispositivo de 5 lpm puede funcionar de forma simultánea con dos pacientes pediátricos que posean afecciones respiratorias o hipoxia. Suponiendo que cada infante reciba hasta dos lpm de aire sin humidificar. Un dispositivo de 5 lpm puede ser utilizado en adultos y niños mayores[7].

Concentración de oxígeno a grandes altitudes

En lugares cuya altura se encuentre igual o superior a los dos mil metros sobre el nivel del mar, los requisitos de funcionamiento del concentrador de oxígeno en condiciones de temperatura y humedad elevada no tendrán que ser tan rigurosos, puesto que estas condiciones ambientales rara vez llegan de forma simultánea a los 40 °C con 95 % de humedad relativa (a mayor altura menos temperatura y humedad) [7].

Humidificación

De acuerdo a directrices de la OMS, no se necesita de humidificación cuando la tasa de flujo de oxígeno es hasta de 2 lpm con puntas o catéteres nasales a infantes menores de

cinco años [15]. Tampoco cuando la administración sea en climas tropicales, pues los concentradores suministran oxígeno a temperatura ambiente.

Se requiere de humidificación al momento de emplear un flujo superior a los 2 lpm o cuando no se suministra por la nariz (catéteres nasofaríngeos o cánulas traqueales) [16]. De ser así se debe usar una botella de humidificación, que por lo general viene en el concentrador junto a un dispositivo de administración de oxígeno al paciente. Los humidificadores tendrán conectores de rosca para acoplarse fácilmente a la salida con rosca del concentrador, o en su defecto de un adaptador para concentradores con salida dentada. El agua de la botella deberá ser cambiada de forma constante para evitar la contaminación, se deberá comprobar el flujo de oxígeno en cada cambio con la finalidad de evitar fugas por parte del humidificador.

1.3.3 ETAPAS DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO

1.3.3.1 COMPRESIÓN DEL AIRE

La etapa inicial es la compresión del aire atmosférico, aquí un compresor aumenta la presión del aire bombeándolo hacia el sistema. A pesar de la gran variedad de compresores en el mercado, los más apropiados para la compresión de fluidos gaseosos son los reciprocantes.

Un compresor recíprocante es una herramienta que permite aumentar la presión de un gas en una cámara con un volumen muy reducido mediante un pistón [17]. Cuando se reduce el volumen de un gas se provoca un choque de moléculas, lo cual provoca una mayor presión en el fluido. Estos compresores cuentan con válvulas de admisión y descarga, cada una de estas se abren gracias al diferencial de presión generado en el ciclo del pistón.

El compresor recíprocante cuenta con cuatro etapas (Figura 11):

1. Compresión: Mientras todas las válvulas están cerradas, el pistón sube comprimiendo el gas.
2. Descarga: Se genera una presión en la cámara superior a la de la tubería de descarga, permitiendo expulsar su contenido, aunque por lo general siempre sobra un poco lo cual se denomina volumen muerto.
3. Expansión: El cilindro regresa a su sitio, expandiendo el volumen muerto y bajando la presión.

4. Admisión: La presión interna de la cámara es inferior a la presión que hay en la tubería de admisión, dando paso a que entre el gas. La válvula se cierra cuando las presiones tanto de la cámara como de las tuberías de admisión se igualan.

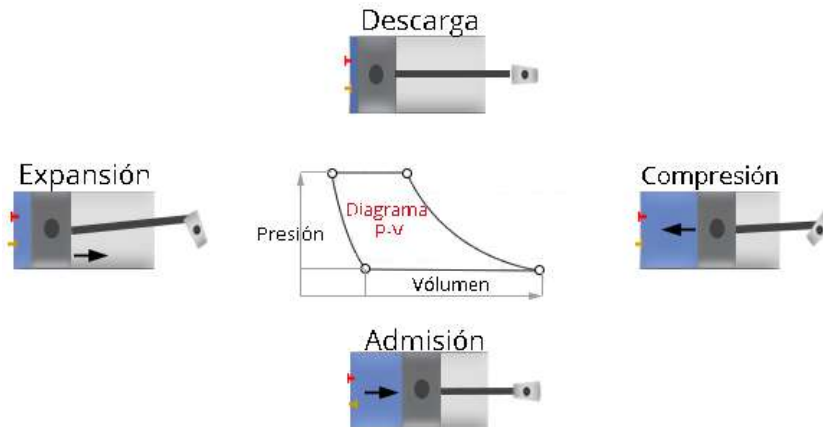


Figura 11. Esquema de las etapas de un compresor recíprocante [17].

1.3.3.2 PRETRATAMIENTO DEL AIRE

Los compresores operan en varios tipos de ambientes, con lo cual se exponen a agentes contaminantes que pueden afectar a su rendimiento. El pretratamiento del aire busca hacer adecuado el flujo de aire atmosférico antes de ingresar a las columnas de adsorción, para esto es importante remover humedad y filtrar partículas sólidas como el polvo [18].



Figura 12. Filtro de aire de espuma para concentrador SYSMED M50 [19].

1.3.3.3 SEPARACIÓN DEL AIRE POR ADSORCIÓN

El aire separa varios de sus elementos dentro de las columnas de adsorción, las cuales funcionan como recipientes a presión que poseen dentro un agente adsorbente. El arreglo de válvulas en la entrada y la salida de las columnas controlan la dirección del flujo según el ciclo de generación [7]. Por lo general las válvulas manuales de cortina (Figura 13) o

bola (Figura 14), que regulan el caudal y abren o cierran el conducto del flujo respectivamente.



Figura 13: Válvula de bola[20].



Figura 14: Válvula de cortina[21].

El arreglo de dos columnas de adsorción hace que el proceso de generación de oxígeno se realice de forma continua, ya que permite que una columna adsorba mientras la otra se regenera. Se recomienda colocar un escape silenciador para evitar mucho ruido por parte del flujo de la purga.

1.3.4 ALMACENAMIENTO DE OXÍGENO

Tras la filtración del oxígeno se procede al almacenamiento, por lo general en recipientes a presión con válvulas de alivio de presión, elementos de seguridad que evitan accidentes en caso de que el tanque exceda el nivel máximo de presión admisible.

1.3.4.1 DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO

La distribución del oxígeno se lo realiza mediante un conducto de salida, equipado con una válvula que regule el caudal. Independientemente del uso final que se le dé al oxígeno, ya sea industrial o médico, se debe asegurar que los conductos estén limpios y esterilizados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de concentrador de oxígeno con capacidad de 5 litros por minuto para el laboratorio de la Carrera de Ingeniería Mecánica, bajo la norma ISO 80601-2-69.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS


- Estudiar diseños y funcionamientos de concentradores de oxígeno existentes en el mercado, mediante fuentes bibliográficas y fichas técnicas.
- Definir los parámetros de diseño del concentrador de oxígeno, para obtener una capacidad de 5 litros por minuto.
- Diseñar un dispositivo concentrador de oxígeno bajo los parámetros de diseño establecidos y especificaciones técnicas de la norma ISO 80601-2-69.
- Construir un prototipo de concentrador de oxígeno con capacidad de 5 litros por minuto, cumpliendo los criterios de diseño.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo de concentrador de oxígeno, utilizando un monitor de FiO₂.






CAPITULO II

2 METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

Tabla 4:Listado de materiales.

Nombre	Figura	Descripción
Filtro de aire		Es el encargado de cubrir la entrada del equipo de elementos como polvo, lanas, humo u otros contaminantes sueltos en el aire para alargar la vida útil del compresor [22].
Columnas de adsorción		Son recipientes que permiten realizar el proceso de adsorción por variación de presión (PSA), utilizando adsorbentes para filtrar el oxígeno del aire [23].
Compresor (De doble pistón libre de aceite)		Dispositivo de tamaño reducido con bajos niveles sonoros, libre de aceite y ligero; apto para aplicaciones médicas y de fácil instalación [24].
Zeolita		Adsorbente empleado en el proceso PSA que posee una mayor atracción por el nitrógeno [25].

Nombre	Figura	Descripción
Caudalímetro		<p>Dispositivo que reduce la presión de la fuente de oxígeno hasta su suministro [26].</p>
Electroválvula		<p>Dispositivos electromecánicos que controlan el flujo circulante en un ducto, funcionando gracias a la acción de una electroválvula. Con dos posiciones: abierto y cerrado [27].</p>
Arduino UNO		<p>Placa basada en el microcontrolador ATmega328P, cuenta con 14 pines digitales, 6 entradas analógicas, un conector USB, un botón reset, terminales para conexión ICSP y la alimentación [28].</p>
Analizador de oxígeno		<p>Dispositivo que permite medir la pureza de oxígeno en un flujo de aire, gracias a una celda electroquímica que entrega un voltaje de acuerdo con la concentración de oxígeno [29].</p>
Tubo flexible de PVC		<p>Tubos de polivinilo empleados en el sector industrial, en el ámbito alimenticio y químico. Se caracteriza por ser inodoro, incoloro, resistente y muy estable a altas temperaturas [30].</p>

2.2 METODOS

La metodología utilizada en el proyecto consta de varias etapas, las cuales permite comprender de mejor manera el funcionamiento de un equipo concentrador de oxígeno, por lo cual es importante respetar su orden al momento de llevar a cabo el proyecto para cumplir con las expectativas requeridas.

2.2.1 INVESTIGACION BIBLIOGRÁFICA-DOCUMENTAL

El presente proyecto se fundamenta en la búsqueda de información mediante fuentes digitales, tales como: libros, tesis de grado, artículos científicos, normas estandarizadas, revistas, fichas técnicas, manuales, diarios entre otras fuentes certificadas, con la finalidad de obtener información relevante y veraz de autores con temas de investigación acerca de los concentradores de oxígeno, sus componentes y el oxígeno como tal.

2.2.2 INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

Se basa en explorar los estudios de un determinado problema, entorno, servicio o bien la oportunidad de elaborar un producto teniendo en cuenta que se parte de un conocimiento casi nulo para realizarlo. Por lo cual en este proyecto busca una aproximación a la elaboración de un concentrador de oxígeno, cumpliendo con la norma ISO 80601-2-69 y sus características requeridas por parte del Laboratorio de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. Durante el desarrollo de la investigación se podrá apreciar el comportamiento de sus componentes en cada una de las etapas de la separación del oxígeno del aire, con lo cual se podrá realizar una valoración de estos y poder ver mejores alternativas para que tengan una mejor eficiencia a un bajo costo.

2.2.3 INVESTIGACION DESCRIPTIVA

Este tipo de investigación permite describir la población, situación o el fenómeno sobre un caso de estudio, en este proyecto la finalidad es determinar un concentrador de oxígeno con una salida de 5 lpm de oxígeno, a partir de otros concentradores con la finalidad de hacerlo más eficiente sin afectar en la calidad del oxígeno. Esta investigación no alterará el principio del funcionamiento del concentrador de oxígeno más bien su intención es mejorar su funcionamiento y abaratar costos, con los existentes en el mercado local.

2.2.4 INVESTIGACION NUMERICA

En este proyecto se busca explicar y replicar el proceso de adsorción por variación de presión o PSA, fundamental en el proceso de separación de oxígeno del aire. Donde se determinará la presión interna máxima que deberá soportar las columnas de adsorción, con lo cual se podrá seleccionar un diámetro y material adecuado para su diseño.

2.2.4.1 PROGRAMAS

En el presente proyecto se hará uso de softwares como: SOLIDWORKS 2014, Proteus, Arduino y Microsoft Visio. Estos Softwares permitirán dar un control y seguimiento al proyecto desde la selección de componentes hasta la toma de datos finales.

SolidWorks

Es un software de diseño asistido por computadora, que permite modelar elementos 2D o 3D, realizar ensambles de piezas, elaborar planos, simulaciones, entre otros.

Proteus

Es un software que permite dibujar esquemas eléctricos y simular su funcionamiento en tiempo real.

Arduino

Es un software de programación libre, que se usa como microcontrolador permitiendo controlar y alimentar una cantidad limitada de dispositivos.

Visio

Es una herramienta que permite crear diagramas de flujo y gráficos vectoriales profesionales, de forma rápida y sencilla.

2.2.5 MÉTODOS Y TÉCNICAS

Son las formas o maneras en cómo se realiza un proyecto a manera de que sea sistemático u organizado y mediante cierto tipo de técnicas permitan contribuir al cumplimiento de los objetivos establecidos.

2.2.5.1 MÉTODO INDUCTIVO

El método inductivo es una estrategia de razonamientos que mediante una secuencia de pasos permite obtener conclusiones generales, parte de la observación, como lo es el corroborar el

funcionamiento de todos los componentes del concentrador de oxígeno, registrar los datos obtenidos para posterior analizarlos y por último contrarrestar los efectos negativos de los componentes, ya sea modificándolos o reemplazándolos con prototipos que cumplan con lo esperado.

2.2.5.2 MÉTODO DEDUCTIVO

El método deductivo por lo general parte de controversias genéricas que permiten llegar a parámetros específicos se enfoca de forma primordial en variables como el flujo de salida de oxígeno, pureza del oxígeno (concentración de oxígeno entre 82 y 96%), entrada de flujo de aire, tipo y cantidad de adsorbente (Zeolita), entre otros. Todos estos parámetros en cierta magnitud deberán proporcionar un producto de calidad (oxígeno de alta pureza), puesto una alteración de estos parámetros darán como resultado un producto defectuoso.

2.2.5.3 MÉTODO ANALÍTICO

El método analítico se basa en la desarticulación de un sistema, dividiendo todo por partes para poder observar características, causas y efectos que pueden provocar varios componentes mientras están trabajando por separado. Se debe tener en cuenta que para que un concentrador de oxígeno este apto para funcionar debe cumplir con ciertos requisitos como lo son una pureza de oxígeno mínimo del 82% y un ruido inferior a los 60 dB(A), según la norma ISO 80601-2-69. Al desmontar un equipo de estos se podrá analizar la importancia de cada componente y el grado de importancia en cada uno de sus procesos.

2.2.5.4 MÉTODO SINTÉTICO

El método sintético es un procedimiento que tiende a reconstruir un todo, dicho de otra forma, su misión es la de comprender de forma global el funcionamiento del sistema PSA (Adsorción por Oscilación de Presión), proceso en el cual se separa un gas de una mezcla de gases. Teniendo en cuenta factores externos que pueden interrumpir en la operación y alterando el correcto funcionamiento del sistema del concentrador de oxígeno.

2.2.5.5 METODO DE PROCESO DE DISEÑO

La Figura 15 indica las etapas con las cuales se desarrolló el proyecto, que van desde el levantamiento de información para la selección de componentes hasta la automatización y ensamble del banco de pruebas.

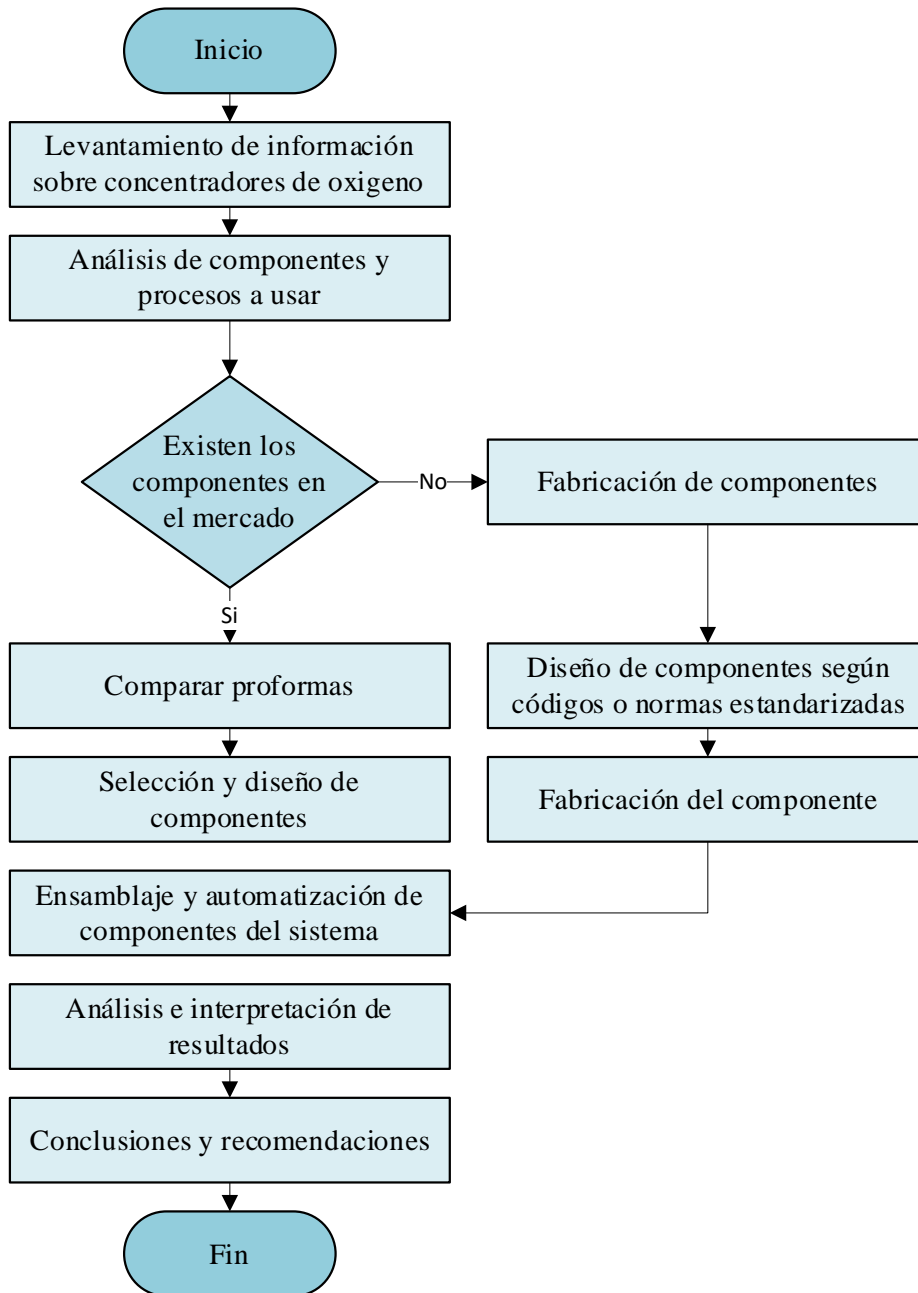


Figura 15. Diagrama de flujo para elaborar un banco de pruebas concentrador de oxígeno.

2.2.5.6 METODO DE PONDERACION LINEAL (SCORING)

Este método permite tratar con situaciones de incertidumbre o bien con situaciones en las cuales se tenga poca información [31]. El Scoring permite asignar un valor a cada alternativa suponiendo una relación transitiva entre dichas alternativas, las cuales se evalúan por preferencia o comparabilidad. Es un método compensatorio, manipulable y dependiente del peso que se le asigne a cada criterio, permitiendo seleccionar los mejores componentes para el concentrador de oxígeno, tomando en cuenta criterios como costo, accesibilidad a los componentes, prestación, entre otros. Se desarrollará de acuerdo con el diagrama de la Figura 16.

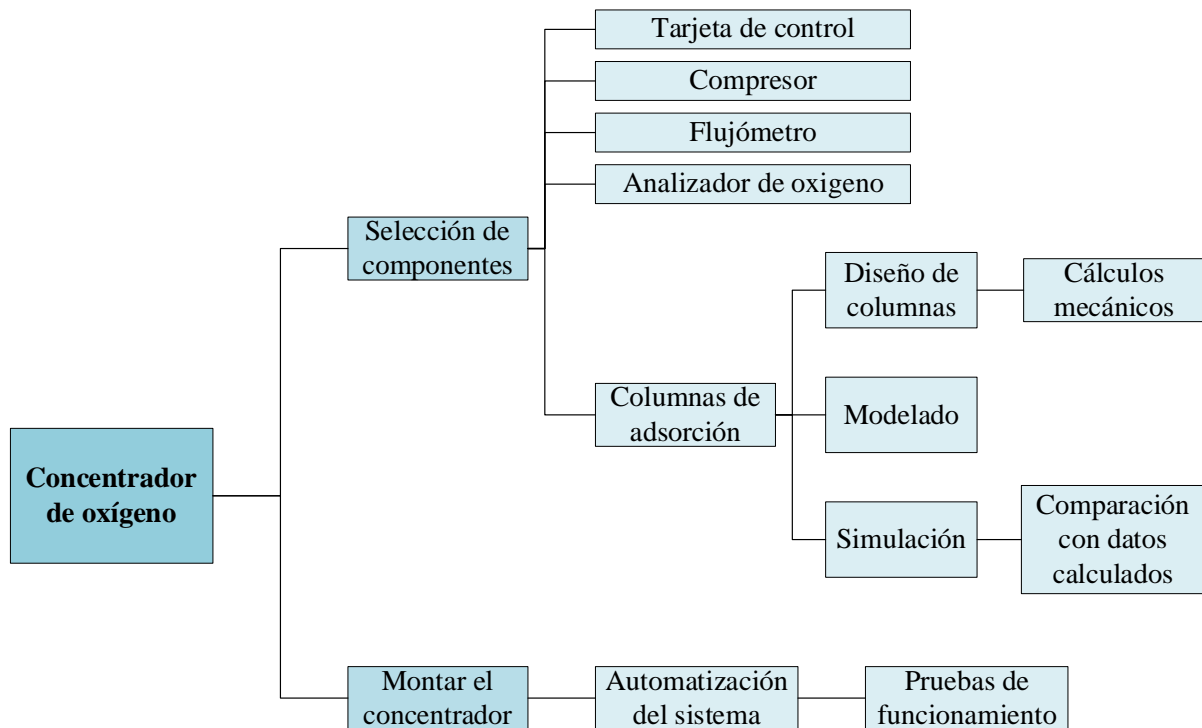


Figura 16. Diagrama general del desarrollo del proyecto.

El montaje del banco de pruebas se realizará de acuerdo con el diagrama de la Figura17:

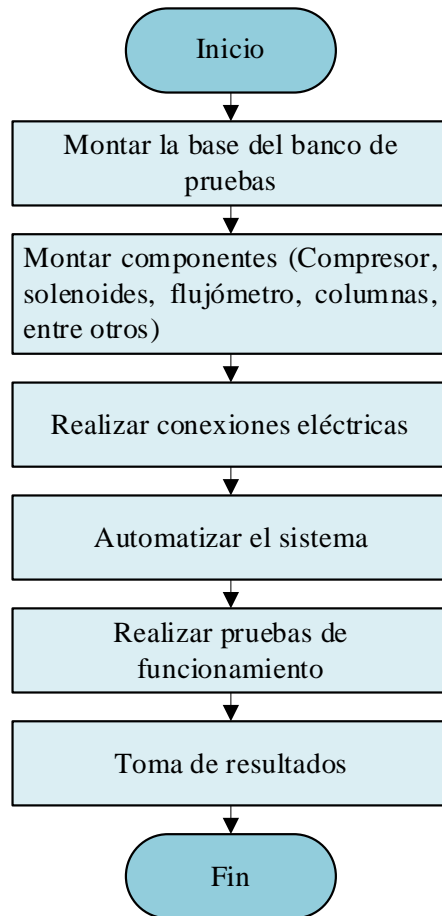


Figura 17: Diagrama de procesos para el montaje del banco de pruebas.

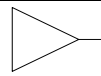










El concentrador de oxígeno deberá cumplir con la norma ISO 80601-2-69:2014, en donde se detallan las especificaciones técnicas que deben ser cumplidas por parte del fabricante y son recomendadas por la Organización Mundial de la Salud en [7], estas especificaciones (Tabla 5) permitirán ayudar a seleccionar los componentes para el sistema concentrador de oxígeno:

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno según la norma ISO 80601-2-69:2014 [7]

Requisitos	Valores o indicaciones
Salidas de oxígeno	1 o 2
Eficiencia eléctrica	< 70W x lpm
Interfaz de usuario sencilla	Números y pantallas visibles
Indicador de horas de funcionamiento	Cronometro digital o analógico
Salidas de oxígeno	Salida con conexión dentada de 1/4 de pulgada o equivalente
Flujómetro	Tasa de flujo mínima de 0,5 lpm
Monitor de oxígeno	Indicar cuando la concentración sea menor al 82%
Nivel de ruido	<50 dB (A)

La generación de oxígeno se logra mediante el método PSA, como se mencionó anteriormente. A continuación, se muestra un diagrama esquemático del proceso PSA de generación de oxígeno (Figura 18) con componentes manuales:

Tabla 6. Representación los símbolos del proceso de concentración de oxígeno.

Símbolo	Significado
	Toma de aire
	Filtro de aire
	Compresor
	Válvula de cortina
	Válvula de bola
	Silenciador
	Purga
	Manómetro
	Columna de adsorción
	Salida de oxígeno
	Flujómetro

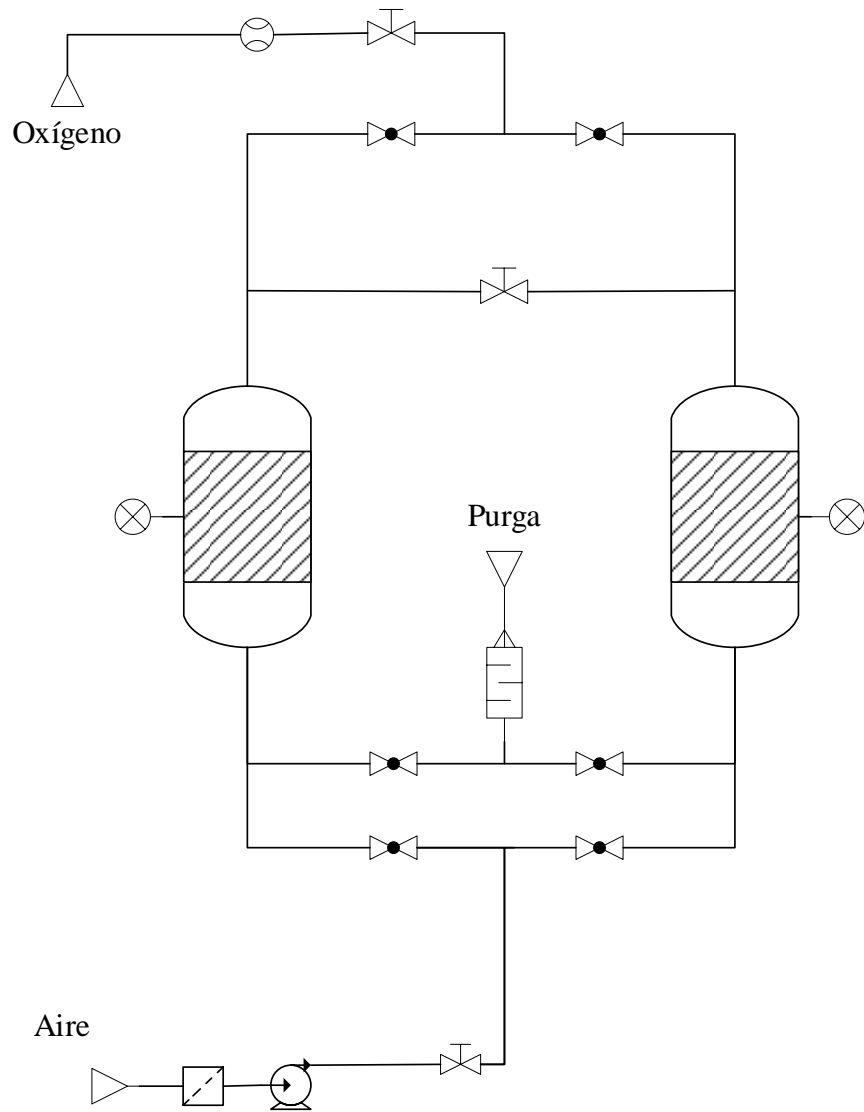


Figura 18. Esquema del PSA en un concentrador de oxígeno [32].

CAPITULO III

3 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo se centra en el estudio del diseño de un concentrador de oxígeno, donde se propone cinco etapas para su elaboración:

- ETAPA I: Estudio del proceso de separación de oxígeno del aire.
- ETAPA II: Planteamiento de alternativas para la construcción del prototipo concentrador de oxígeno.
- ETAPA III: Diseño y selección de componentes.
- ETAPA IV: Construcción y automatización del sistema.
- ETAPA V: Pruebas de funcionamiento y validación del estudio referente a la norma ISO 80601-2-69.

ETAPA I: ESTUDIO DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE OXÍGENO DEL AIRE.

3.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DURANTE EL PROCESO PSA.

La PSA (Adsorción por Variación de Presión) es el proceso de separación de gases que usara el concentrador de oxígeno, específicamente en este proyecto el ciclo de Skarstrom de 4 etapas, el cual adiciona una etapa al ciclo de 3 etapas desarrollado por Guarín de Montgareuil y Dominé [33], con la finalidad de remover todo el nitrógeno que se retiene en la columna y adicionando una etapa de purga.

3.1.1 PRIMERA ETAPA: PRESURIZACIÓN

La primera columna se presuriza con aire que proviene del compresor, donde el adsorbente retiene mayormente al nitrógeno del aire y generando un flujo enriquecido de oxígeno. Este proceso se realiza manteniendo aislado a la segunda columna, hasta que la primera columna llegue a una determinada presión.

3.1.2 SEGUNDA ETAPA: ALIMENTACIÓN

En esta etapa continua la presurización en la primer columna y adsorción de nitrógeno dando lugar a la producción de oxígeno. A la vez las dos columnas se conectan pasando el oxígeno junto con algo de nitrógeno a la segunda columna, haciendo más fácil la purga de nitrógeno.

3.1.3 TERCERA ETAPA: ESCAPE

Una vez saturado el adsorbente de la primera columna, las columnas se aíslan nuevamente, la primera columna se despresuriza a presión atmosférica y la segunda columna es alimentada por el flujo de aire proveniente del compresor. Para poder liberar el nitrógeno de la primera columna, la dirección del flujo se revierte liberando el nitrógeno a la atmósfera, mientras se regenera el adsorbente.

3.1.4 CUARTA ETAPA: PURGA

Se reconecta las 2 columnas y un porcentaje del oxígeno producido pasa en contra corriente a la alimentación del aire. Esta etapa de purga asegura que todo el nitrógeno se libere de las columnas, permitiendo repetir todo el ciclo nuevamente.

La Figura 19 muestra un diagrama del funcionamiento del ciclo de Skarstrom, el cual indica las válvulas que se activan y el tipo de gas que está circulando:

- Verde: Aire.
- Azul: Oxígeno.
- Rojo: Aire sin oxígeno escapando.
- Amarillo: Aire sin oxígeno en contracorriente.

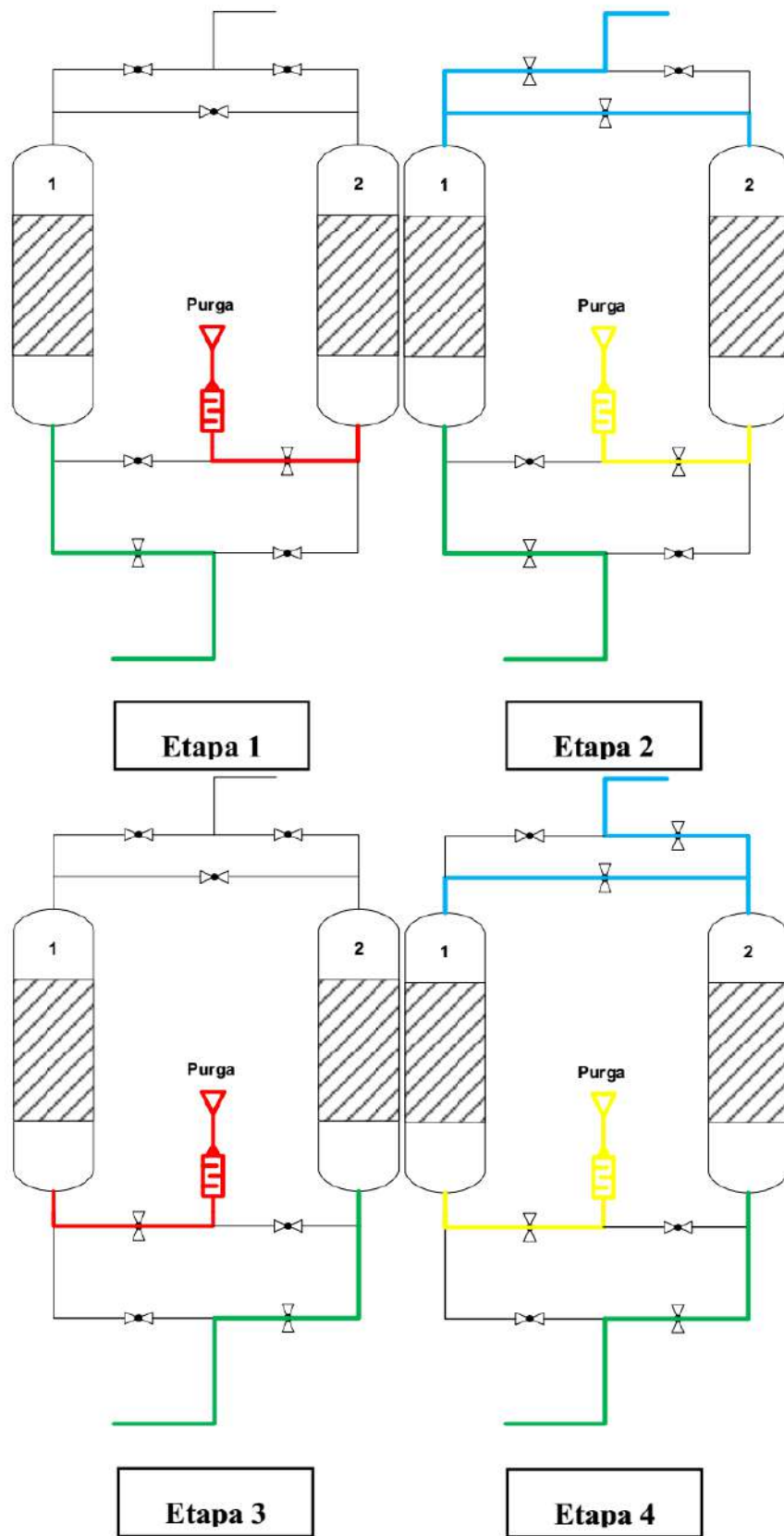


Figura 19. Ciclo de Skarstrom de 4 etapas [33].

3.2 ANÁLISIS DEL TIPO DE ADSORBENTE A USAR.

El adsorbente idóneo para este tipo de aplicaciones (separación de oxígeno del aire) es la zeolita [34], pero existe una gran variedad de zeolitas, las cuales varían de acuerdo al tamaño de sus poros o cationes, donde destaca la zeolita 13X (Figura 20) y la zeolita tipo 5A. La Tabla 7 detalla las características de la zeolita 13x:

Tabla 7. Características de la zeolita 13X XINTAO [35],[36].

Características	Valor
Presentación	Esfera
Nombre	Zeolita 13X HP
Marca	XINTAO
Tipo	Adsorbente
Tamaño promedio de los gránulos	0.07 mm
Densidad de apilamiento	0.66 g/ml
Capacidad calorífica	0.32 cal/g.k
Porosidad de las partículas	10 Å
Gestión de calidad	ISO 9007:2015
Formula química	$\text{Na}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 (2.8 \pm 0.2) \text{SiO}_2 (6 - 7) \text{H}_2\text{O}$



Figura 20. XINTAO zeolita molecular 13X HP [36].

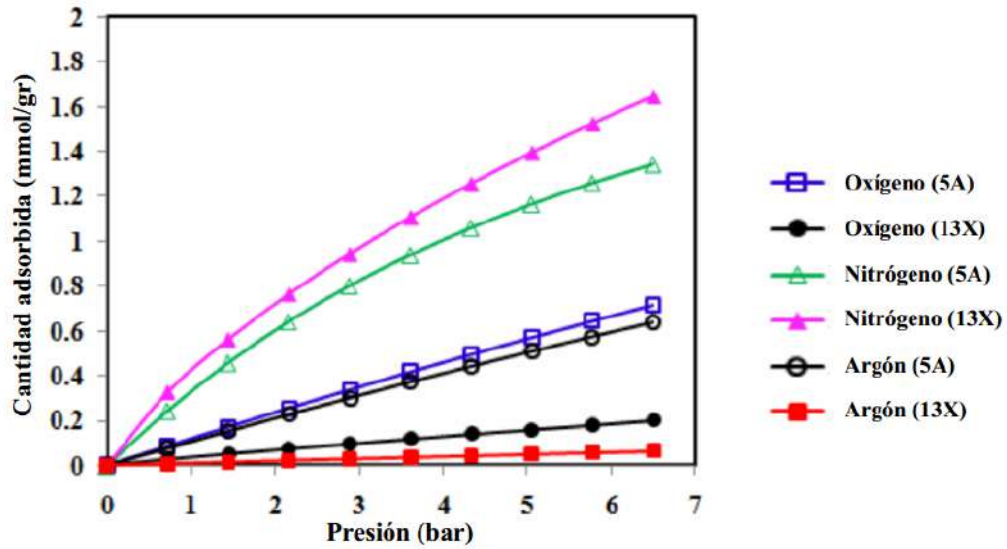


Figura 21. Capacidad de adsorción de las zeolitas 13X y 5A [35].

Mofarahi y Shokroo [35] compararon la capacidad de adsorción de estas zeolitas a diferentes presiones, donde se concluyó que la zeolita 13X tiene mayor capacidad de adsorción de partículas de nitrógeno que la zeolita 5A. En la Figura 21 se observa que la capacidad de adsorción de la zeolita 13X es superior a la zeolita 5A, razón por la cual se usará zeolita 13X en el presente proyecto. Las características del adsorbente que se usó son:

3.3 PLANTEAMIENTO DEL DIAGRAMA DE PROCESOS DEL MODELO CONCENTRADOR DE OXÍGENO A REALIZAR.

Ya establecido el método de separación de gases a emplear, junto con su adsorbente, es importante definir un diagrama de procesos del sistema concentrador de oxígeno, esto para facilitar la construcción del modelo y conocer los posibles componentes que se emplearán. El esquema de la Figura 22 se basa en el proceso PSA de cuatro etapas establecido por Skarstrom [33] y será el modelo a seguir del proyecto:

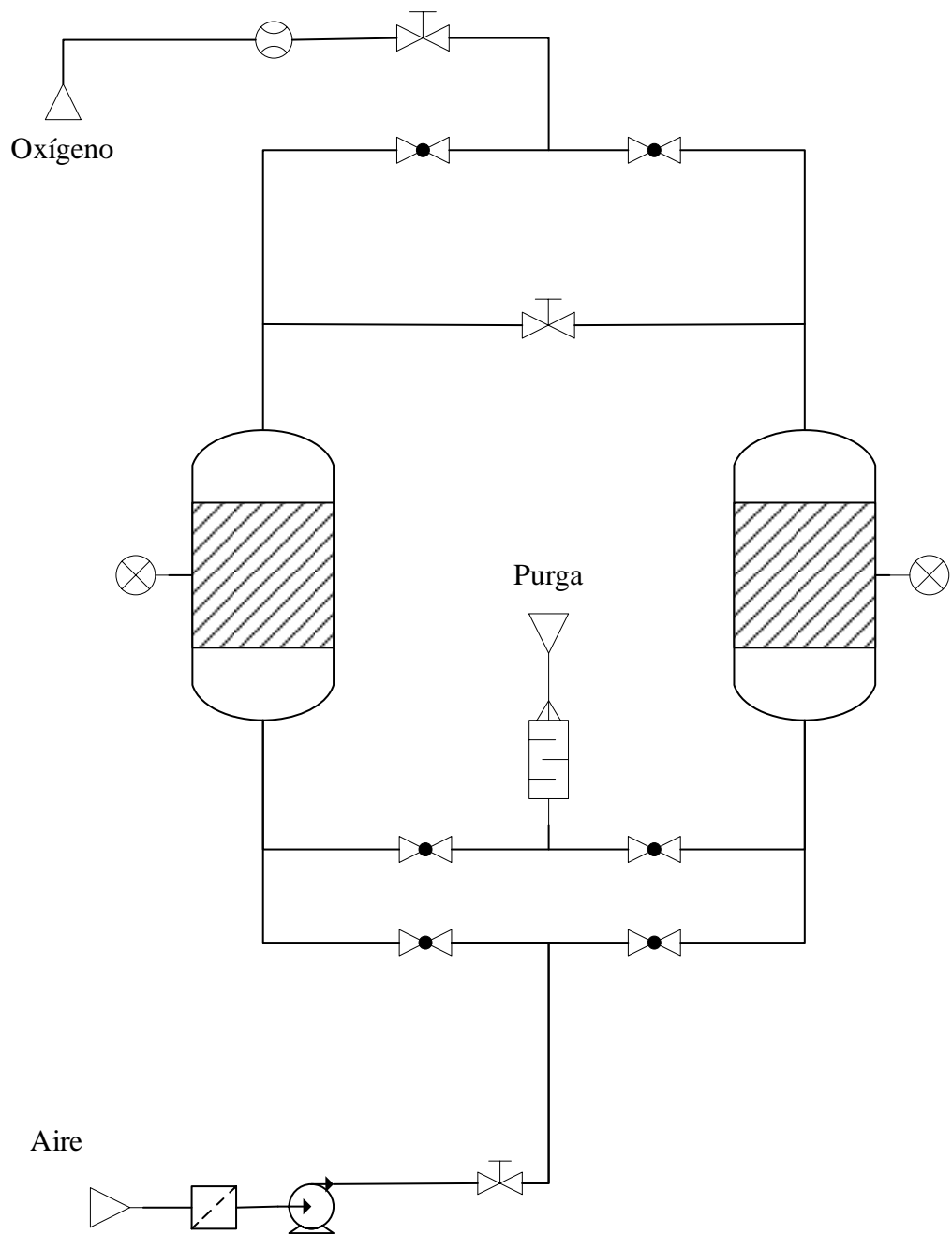













Figura 22. Diagrama del proceso PSA por el método Guerin-Dominé para concentración de oxígeno.

La Tabla 8 representa los símbolos de cada componente usado en el diagrama de procesos:

Tabla 8. Descripción de los símbolos utilizados en el esquema del proceso PSA para la concentración de oxígeno.

Símbolo	Significado
	Aire
	Filtro de aire
	Compresor
	Válvula solenoide
	Purga
	Columna de adsorción
	Válvula de cortina
	Motor a pasos
	Flujómetro
	Analizador de oxígeno
	Oxígeno

ETAPA II: PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO CONCENTRADOR DE OXÍGENO.

3.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.

Es importante considerar la forma en la que se distribuirán los componentes al momento de montar el sistema. El presente proyecto al ser un prototipo, será recomendable construirlo como un banco de pruebas, esto para obtener facilitar la obtención de varios datos de gran interés, tales como: caudal y pureza del oxígeno; Datos que son vitales durante su funcionamiento.

Con el banco de pruebas se podrá evaluar el comportamiento del sistema, verificando si cumple la norma ISO 80601-2-69:2014 de Equipos Electro médicos. A parte de que también será más didáctico para demostrar sus procesos de una forma ordenada.

3.5 MODIFICACIONES PLANTEADAS RESPECTO A CONCENTRADORES DE OXÍGENO COMERCIALES.

Las modificaciones realizadas respecto a un concentrador de oxígeno comercial pretenden reemplazar componentes, esto debido a la escasez de este tipo de componentes a nivel nacional. La mayoría de las componentes e insumos de estos equipos son origen extranjero, razón por la cual armarlo de la misma forma que un equipo comercial resultaría costoso únicamente por temas de exportación. Se plantea utilizar componentes que sean de fácil adquisición a nivel nacional, elementos tales como: válvulas solenoides y su sistema de control (microcontrolador o microordenador).

3.5.1 VÁLVULAS SOLENOIDES

Los concentradores de oxígeno comerciales disponen de arreglos de válvulas tanto antes como después de las columnas de adsorción (Figura 23), los cuales permiten dirigir los flujos de aire u oxígeno hacia columnas, purga o salidas del producto respectivamente.



Figura 23. Motor síncrono de 8 rpm.

Debido a que estos arreglos son propios de los fabricantes de concentradores de oxígeno y no se los encuentra en el mercado, se los reemplazara con válvulas solenoides (Figura 24) que permitirán simular el funcionamiento del arreglo de válvulas.



Figura 24. Válvula solenoide[27].

Las características de la válvula solenoide se especifican en la Tabla 9:

Tabla 9. Especificaciones técnicas válvula solenoide 3/4" [27].

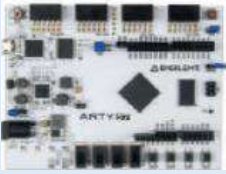


Especificación	Valor
Voltaje de operación	12 V DC
Corriente de operación	0.6 Amp
Potencia de consumo	8 W
Temperatura de funcionamiento	5° - 100°C
Presión mínima de funcionamiento	0.02 MPa
Presión máxima de funcionamiento	0.8 MPa
Conector tubería	Rosca externa 3/4 " Macho
Tipo de válvula	Diafragma
Material del cuerpo	Plástico ABS
Dimensión	72x60x34
Peso	103 gr

3.5.2 TARJETA DE CONTROL

Para el desarrollo del control y monitoreo del banco de pruebas del concentrador de oxígeno, existen diversos componentes electrónicos, tales como: actuadores, controladores y tarjetas de control que permitirán llevar a cabo todas las funciones de un equipo concentrador de oxígeno.

Existe gran variedad de tarjetas de control con las cuales se puede adquirir, controlar y gestionar datos. La Tabla 10 representa varios dispositivos con sus principales características, las cuales serán evaluadas por el método de ponderación lineal, esto con la finalidad de seleccionar la tarjeta de control adecuada para el proyecto:

Tabla 10. Especificaciones de las tarjetas de control [37], [38] ,[39].

TARJETA	FPGA ARTY S7	ARDUINO UNO	RASPBERRY Pi 3
			
PROPIEDAD			
Fabricante	Digilent	Arduino LLC	Fundación Raspberry Pi
Microcontrolador	Xilint XC7S25-CSGA324	ATmega328	ARM Cortex-A72
Voltaje de operación	5 V	5 V	5,1 V
Voltaje de entrada	7 - 15 V	7 - 12 V	2,5 - 5 V
Velocidad de reloj	450 MHz	16 MHz	900 MHz
Pines Digitales	30	14	40
Pines Analógicos	12	6	0
Memoria SRAM	21 700 Kb	2 Kb	1Gb
Memoria FLASH	1 620 Kb	32 Kb	MicroSD
Comunicación	UART, SPI	UART, Serial	UART, Serial
Dimensión	203 x 152 mm	68,6 x 53,4 mm	82 x 56 mm
Costo	\$200	\$13.90	\$119.99

Otro criterio importante para la selección de estas tarjetas de control es la adquisición de estos a nivel nacional, que se evaluó del 1 al 10 (Tabla 11), de acuerdo con disponibilidad en tiendas físicas y virtuales a nivel nacional:

Tabla 11. Criterio de fácil adquisición en tarjetas de control.

TARJETA	FPGA ARTY S7	ARDUINO UNO	RASPBERRY Pi 3
CRITERIO			
Fácil adquisición (1-10)	5	10	7

La Tabla 12 evalúa los criterios más importantes para seleccionar la tarjeta gráfica, también se impone un peso en cada criterio del 1 al 5, siendo 5 el factor más importante a la hora de seleccionar un componente:

Tabla 12. Criterios para ponderación de tarjetas de control.

TARJETA	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
CRITERIO				
Costo (\$)	5	200	13,9	119,99
Fácil adquisición	4	5	10	6
Velocidad de reloj (MHz)	2	450	16	900
Memoria RAM (Kb)	2	21 700	2	1 000 000

Primero se minimizará el criterio del costo, esto dividiendo el costo de cada tarjeta para 1. Luego se sumará los valores de cada criterio y los pesos (Tabla 13):

Tabla 13. Minimización del criterio costo en tarjetas de control.

TARJETA	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma
CRITERIO					
Costo (\$)	5	0.005	0.072	0.008	0.085
Fácil adquisición	4	5	10	6	21
Velocidad de reloj (MHz)	2	450	16	900	1 366
Memoria RAM (Kb)	2	21 700	2	1 000 000	1 021 702
Suma	13				

Cada criterio y peso se dividirá por su total (Tabla 14):

Tabla 14. Criterios y pesos de las tarjetas de control divididos por su total.

TARJETA CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo (\$)	0.385	0.059	0.847	0.094
Fácil adquisición	0.308	0.238	0.476	0.286
Velocidad de reloj (MHz)	0.154	0.329	0.012	0.659
Memoria RAM (Kb)	0.154	0.021	0	0.979

Se multiplica el peso de cada criterio por el valor de criterio de cada alternativa, luego se sumarán y la mejor alternativa será la que posea un porcentaje más alto:

Tabla 15. Ponderación de la mejor alternativa en tarjetas de control.

TARJETA CRITERIO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo (\$)	0.023	0.326	0.036
Fácil adquisición	0.073	0.147	0.088
Velocidad de reloj (MHz)	0.051	0.002	0.101
Memoria RAM (Kb)	0.003	0.000	0.151
Suma	15%	47%	38%

Mediante la ponderación lineal se seleccionó la alternativa 2, Arduino UNO (Tabla 15). Destacando por su fácil accesibilidad y poco costo. Siendo la tarjeta de control a utilizar en el presente proyecto.

ETAPA III: SELECCIÓN Y DISEÑO DE COMPONENTES DE COMPONENTES.




3.6 SELECCIÓN DE COMPONENTES.

Para la elaboración del banco de pruebas, así como el sistema de control y monitoreo del concentrador de oxígeno se utilizaron varios componentes los cuales le permiten funcionar adecuadamente. Estos componentes se seleccionaron mediante un análisis comparativo y selección por el método de ponderación lineal, basándose en criterios como su costo, disponibilidad y propiedades de cada componente.

3.6.1 COMPRESOR

Para suministrar aire se seleccionó de entre tres alternativas de compresores, destacando por ser silenciosos, no contaminan al ser libres de aceite y no requieren de filtros. Las características de los compresores se detallan en la Tabla 16:

Tabla 16. Características de las compresores [40], [41].

COMPRESOR PROPIEDAD			
Modelo	HC80A	HC550A-1	HC80C
Fabricante	GLEEMAN	HCEM	HCEM
Potencia de entrada	≤100W	≤550 W	≤ 85W
Flujo de aire	17 LPM	130 lpm	25 lpm
Temperatura de trabajo	-5° - 40° C	-5° - 40° C	-5° - 40° C
Ruido	≤48Db (A)	≤61 dB (A)	≤48 dB (A)
Voltaje	110 V	110 V	110 V
Peso	2.25 kg	10.4 kg	2.1 kg
Dimensión	150x95x135 mm	240x113x200 mm	152x90x126 mm
Tipo de Lubricación	Libre de aceite	Libre de aceite	Libre de aceite
Presión de trabajo	2 bar	2 bar	2 bar
Costo	\$235.00	\$350.00	\$250.00

De igual forma, se consideró el criterio de la fácil adquisición para los compresores (Tabla 17):

Tabla 17. Criterio de fácil adquisición en compresores.

COMPRESOR			
CRITERIO	HC80A	HC550A-1	HC80C
Fácil Adquisición (1-10)	5	3	7.5

Ya conocida las propiedades de los compresores a evaluar, se selecciona los criterios que más destacan de los componentes para su selección y se asigna un peso a cada uno, tales como: costo, facilidad de adquisición, potencia de entrada (alimentación), flujo de aire y nivel de ruido (Tabla 18):

Tabla 18. Criterios para ponderación de compresores.

COMPRESOR				
CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo (\$)	3	235	350	250
Fácil adquisición	5	5	3	7.5
Potencia de entrada (W)	2	100	550	85
Flujo de aire (Kb)	2	17	130	25
Nivel de ruido dB(A)	1	48	61	60

Se minimiza criterios como costo, nivel de ruido y potencia de entrada (Tabla 19). Se suman los valores de los pesos de cada criterio y también los valores de cada alternativa.

Tabla 19. Minimización de criterios como costo, potencia de entrada y nivel de ruido en compresores.

COMPRESOR CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma
Costo (\$)	3	0.0043	0.0029	0.004	0.0112
Fácil adquisición	5	5	3	7.5	15.5
Potencia de entrada (W)	2	0.01	0.002	0.012	0.024
Flujo de aire (Kb)	2	17	130	25	172
Nivel de ruido dB(A)	1	0.0208	0.0164	0.0167	0.0539
Suma	13				

Cada criterio y peso se divide por su total (Tabla 20).

Tabla 20. Criterios y pesos divididos por su total.

COMPRESOR CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo (\$)	0.231	0.384	0.259	0.357
Fácil adquisición	0.385	0.323	0.194	0.484
Potencia de entrada (W)	0.154	0.417	0.083	0.5
Flujo de aire (Kb)	0.154	0.099	0.756	0.145
Nivel de ruido dB(A)	0.077	0.386	0.304	0.31

Se multiplica el peso de cada criterio por el valor de criterio de cada alternativa, luego se sumarán y la mejor alternativa será la que posea un porcentaje más alto:

Tabla 21. Ponderación de la mejor alternativa.

COMPRESOR	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
CRITERIO			
Costo (\$)	0.089	0.060	0.082
Fácil adquisición	0.124	0.075	0.186
Potencia de entrada (W)	0.064	0.013	0.077
Flujo de aire (Kb)	0.015	0.116	0.022
Nivel de ruido dB(A)	0.030	0.023	0.024
Suma	32%	29%	39%

Mediante la ponderación lineal se seleccionó la alternativa tres, un compresor HCEM-HC80C (Tabla 21). La cual destaca sobre las demás alternativas principalmente por ser más fácil de adquirir, una de las menos ruidosas y ser la que menos energía consume. Respecto a flujo de aire se encuentra superior a la primera alternativa, pero inferior a la segunda, sin embargo, es suficiente para el trabajo que va a realizar.

3.6.2 CONTROL Y MONITOREO DE RESULTADOS

3.6.2.1 FLUJÓMETRO

Existe una variedad de dispositivos que permiten medir el flujo masico de gases. Puede ser un flujómetro independiente, que funcione sin interactuar con otros dispositivos del sistema, o puede ser un flujómetro que funcione en conjunto con el sistema, es decir, funcione con ayuda de un microcontrolador. Los flujómetros para comparar serán el FS300A caudalímetro sensor de flujo de $\frac{3}{4}$ de pulgada y el medidor de gas digital portátil MF5712 (Tabla 22).

Tabla 22. Características de los flujómetros [14], [15].

FLUJOMETRO		
CRITERIO		
Modelo	FS300A	MF5712
Fabricante	SEA	Beacon Pet
Voltaje de alimentación	5 V DC	-
Corriente de operación	15 mA	-
Tipo de batería	-	4x Batería AA
Presión máxima	<2 MPa	<0,8 Mpa
Precisión	+/- 3%	+/- 2%
Tamaño de la conexión	3/4 "	6 mm
Rango de medición	0-60 lpm	0-25 lpm
Display	-	LCD
Costo	9	\$210.00

Se establece un criterio un criterio de fácil adquisición para los flujómetros (Tabla 23):

Tabla 23. Criterio de fácil adquisición en flujómetros.

FLUJOMETRO	FS300A	MF5712
CRITERIO		
Fácil Adquisición (1-10)	8	2

Considerando las características de los flujómetros, se selecciona las más importantes. Se establece criterios en base a las características y se asigna un peso a cada criterio. Los criterios para considerar para su selección por ponderación son: Costo, fácil adquisición, precisión y rango de trabajo (Tabla 24).

Tabla 24. Criterios para ponderación de flujómetros.

FLUJOMETRO CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo (\$)	3	9	210
Fácil adquisición	5	8	2
Precisión	3	+/- 3%	+/- 2%
Rango de trabajo	1	0-60 lpm	0-25 lpm

Se minimiza criterios como costo y precisión. Se suman los valores de los pesos de cada criterio y también los valores de cada alternativa (Tabla 25).

Tabla 25. Minimización de criterios como costo y precisión en flujómetros.

FLUJOMETRO CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	SUMA
Costo (\$)	3	0.111	0.005	0.116
Fácil adquisición	5	8	2	10
Precisión	3	33.33	50	83.33
Rango de trabajo	1	60	25	85
SUMA	12			

Cada criterio y peso se divide por su total (Tabla 26).

Tabla 26. Criterios y pesos divididos por su total.

FLUJOMETRO CRITERIO	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo (\$)	0.25	0.957	0.043
Fácil adquisición	0.417	0.8	0.2
Precisión	0.25	0.4	0.6
Rango de trabajo	0.083	0.706	0.294

Ahora se multiplicará el peso de cada criterio por el valor de criterio de cada alternativa, luego se sumarán y la mejor alternativa será la que posea un porcentaje más alto:

Tabla 27. Ponderación de la mejor alternativa en flujómetros.



FLUJOMETRO CRITERIO	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo (\$)	0.239	0.011
Fácil adquisición	0.334	0.083
Precisión	0.100	0.150
Rango de trabajo	0.059	0.024
Suma	73.14%	26.86%

Con un 73.14% la opción más viable es la alternativa 1, por lo cual el flujómetro a usar será el FS300A de SEA (Tabla 27), el cual destaca por su bajo costo, fácil adquisición y por trabajar en conjunto con un microcontrolador (Arduino Uno), haciendo más fácil la recolección de datos.

3.6.2.2 ANALIZADOR DE OXÍGENO

Los analizadores de oxígeno son equipos o componentes más sofisticados, debido a la precisión y rangos de trabajo en los que operan. Los analizadores de oxígeno a comparar se detallan en la Tabla 28:

Tabla 28. Características de los analizadores de oxígeno [44][45].

ANALIZADOR CRITERIO		
Modelo	VN202 MkII	101020002
Fabricante	Vandagraph Ltd.	Seed Studio
Rango	0 - 100 %	0 - 25%
Precisión	+/- 1%	+/- 3%
Temperatura de operación	0 - 40 °C	-20 - 50°C
Certificaciones	ISO EN 9001:2008 ISO EN 60601-1-2 RoHS	-
Tipo de sensor	R-17VAN (Galvánico)	ME2-O2
Voltaje de entrada	-	5 V
Tipo de batería	2 x MN1500 LR6 1.5V	-
Vida de batería	12 meses	-
Vida útil	-	2 años
Costo	\$330.99	\$100.00

Se establece un criterio un criterio de fácil adquisición para los analizadores de oxígeno (Tabla 29):

Tabla 29. Criterio de fácil adquisición en analizadores de oxígeno.

ANALIZADOR	VN202 MKII	101020002
CRITERIO		
Fácil Adquisición (1-10)	6	2

Considerando las características de los analizadores, se selecciona las más importantes. Se establece criterios en base a las características y se asignan pesos a cada uno. Los criterios para considerar son: Costo, fácil adquisición, precisión y rango de trabajo (Tabla 30).

Tabla 30. Criterios para ponderación de analizadores de oxígeno.

ANALIZADOR	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2
CRITERIO			
Costo (\$)	4	330.99	100
Fácil adquisición	5	6	2
Precisión	2	1%	3%
Rango de trabajo	4	0-100 % O ²	0-25% O ²

Se minimiza criterios como costo y precisión. Se suman los valores de los pesos de cada criterio y también los valores de cada alternativa (Tabla 31).

Tabla 31. Minimización de criterios como costo y precisión en analizadores de oxígeno.

ANALIZADOR	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Suma
CRITERIO				
Costo (\$)	5	0.003	0.01	0.013
Fácil adquisición	4	6	2	8
Precisión	2	100	33.33	133.33
Rango de trabajo	2	100	25	125
Suma	13			

Cada criterio y peso se divide por su total (Tabla 32).

Tabla 32. Criterios y pesos del analizador de oxígeno divididos por su total.

ANALIZADOR	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2
CRITERIO			
Costo (\$)	0.385	0.231	0.769
Fácil adquisición	0.308	0.75	0.25
Precisión	0.154	0.75	0.25
Rango de trabajo	0.154	0.8	0.2

Ahora se multiplicará el peso de cada criterio por el valor de criterio de cada alternativa, luego se sumarán y la mejor alternativa será la que posea un porcentaje más alto:

Tabla 33. Ponderación de la mejor alternativa en analizadores de oxígeno.

ANALIZADOR	Alternativa 1	Alternativa 2
CRITERIO		
Costo (\$)	0.089	0.296
Fácil adquisición	0.231	0.077
Precisión	0.116	0.039
Rango de trabajo	0.123	0.031
Suma	55.86%	44.24%

Con un 55.86% la opción más viable es la alternativa 1, por lo cual se usará el analizador de oxígeno HC80A de Vandagraph Ltd. (Tabla 23), destacando ampliamente por su rango de trabajo y fácil uso.

3.6.3 MOTOR A PASOS Y CAUDALÍMETRO CON CONO DE V

Un caudalímetro con cono de V será el encargado de regular los flujos de suministro de oxígeno resultante (Figura 25), con la ayuda de un motor a pasos 28BYJ-48 (Figura 26) que será el encargado de mover el cono en el tramo de tubo recto para obtener los flujos deseados. Generalmente este motor a pasos se lo emplea junto con su modulo controlador asociado ULN2003A.



Figura 25. Caudalímetro con cono de V.

Las características del motor a pasos se detallan en la Tabla 34:

Tabla 34. Especificaciones motor a pasos 28BYJ-48 [46].

Característica	Valor
Modelo	28BYJ-48-5V
Tensión nominal	5V
Cantidad de fases	4
Reductor de velocidad	1/64
Angulo de paso	5625°/64
Frecuencia	100 Hz
Resistencia en CC	50Ω ±7 % (25° C)
Frecuencia con tracción	>600 Hz
Frecuencia sin tracción	>1000 Hz
Resistencia a la aislación	>10M Ω (500V)
Aislación eléctrica	600 VAC/mA/1s
Grado de aislación	A
Ruido	<35 dB



Figura 26. Motor a pasos 28BYJ-48 y controlador ULN2003A [46].

3.6.4 TUBO DE POLIVINILO

El flujo volumétrico tanto de aire como de oxígeno se transportará por medio del tubo de polivinilo (Figura 27). La calidad de este material evita la acumulación de sedimentos, tanto

en el interior como en el exterior, permitiendo un fácil flujo y descarga. Sus características se detallan en la Tabla 35.

Tabla 35. Especificaciones del tubo de polivinilo [47].

Característica	Descripción
Código UNSPSC	40142000
Material	PVC (cloruro de polivinilo)
Presión máxima	60 psi
Marca	Eastrans
Diámetro	1/4 x 3/8 pulgadas
Costo por metro	\$1.06



Figura 27. Tubo de vinilo transparente [47].

3.7 DISEÑO DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN.

Las columnas de adsorción se encuentran sometidas a cargas internas provocadas por la circulación de aire, motivo por el cual se debe diseñar y seleccionar un material que garantice la entereza del equipo durante su funcionamiento. El diseño y manufactura de elementos como las columnas de adsorción, se simplifico con respecto a otros concentradores de oxígeno comerciales.

El concepto planteado en el presente proyecto para la construcción de las columnas de adsorción es la de emplear tuberías comerciales, con la finalidad de reducir costos de fabricación y adquirirlos fácilmente.

3.7.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Las columnas de adsorción, al estar en contacto frecuente con el oxígeno medicinal, necesitan un material que evite oxidación y corrosión, al trabajar a diferentes temperaturas

y presiones, debido a que estos factores desgastan la superficie de la columna, debilitando su estructura y contaminando al producto. El INEN recomienda usar recipientes de aluminio en la NTE INEN 2 343:2004 según [48].

3.7.2 SELECCIÓN DE LA TUBERÍA

Para la selección de la tubería se va a considerar el volumen de las columnas de zeolita comerciales. Inogen es una empresa dedicada a la fabricación de concentradores de oxígeno y también fabrica varios de sus componentes para repuestos, entre ellos las columnas de zeolita (Figura 28). Sus principales modelos son los concentradores de oxígeno Inogen G4 e Inogen G5 (capacidad de hasta 6 litros por minuto), cuyas columnas tienen dimensiones de 2" de largo, 2" de ancho, 5" de alto y pesan 10 onzas cada columna [49].



Figura 28. Inogen One G4 columna de repuesto [49].

Primero se debe conocer el volumen interno de cada columna Inogen One G4, por lo que se transformara sus medidas a milímetros (Tabla 36):

Tabla 36. Dimensiones de una columna Inogen One G4 [49].

Medida	Pulgadas	Milímetros
Ancho (a)	2	50.8
Largo (l)	2	50.8
Alto (h)	5	127

Determinamos el volumen considerándolo como un cubo:

$$V = a * l * h \tag{3.1}$$

$$V = 50.8 * 50.8 * 127$$

$$V = 327741.28 \text{ mm}^3$$

Se supone que aproximadamente un 70% de este volumen consta del adsorbente.

$$V = 327741.28 \text{ mm}^3 * 70\% = 229418 \text{ mm}^3$$

Mediante este volumen y la densidad de la zeolita molecular 13X se obtendrá la cantidad de adsorbente que se deberá utilizar en cada columna. Primero transformamos unidades tanto de volumen como de la densidad de la zeolita:

$$229418 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ cm}^3}{1000 \text{ mm}^3} = 229.418 \text{ cm}^3$$
$$0.66 \frac{\text{gr}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ ml}}{1 \text{ cm}^3} = 0.66 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Calculamos la masa:

$$m = \rho * v \quad (3.2)$$

$$m = 0.66 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 229.418 \text{ cm}^3$$

$$m = 151.41 \text{ gr}$$

Donde:

m = Masa.

ρ = Densidad.

v = Volumen.

Estimado la cantidad de zeolita que se utiliza en una columna de adsorción comercial, se debe seleccionar una tubería de aluminio capaz de almacenar la misma cantidad de zeolita y que sea capaz de soportar hasta 7 bares de presión interna, que será la presión interna máxima a la cual la zeolita adsorberá impurezas del aire entrante.

Para la selección de la tubería se utilizó un catálogo de “Extrusax aluminium extrusion products”, se selecciona el 9461 con un diámetro de 40 mm y un espesor de 1.2 mm:

Tabla 37: Catálogo de Extrusax para tubería de aluminio [50].

REF.	DESCRIPCIÓN	ESPESOR	PESO	PERIMETRO
6209	28.5	1.75	0.397	0.168
7414	29	1.8	0.416	0.171
9258	30	1.5	0.362	0.179
8646	30	2	0.475	0.176
9383	30	2.5	0.583	0.173
9462	32	1.2	0.313	0.194
7598	32	2	0.510	0.189
5371	32.1	1.5	0.389	0.192
5804	32.1	3	0.740	0.183
7574	34.5	10.15	2.144	0.154
8647	35	1.5	0.427	0.210
20444	35	2	0.559	0.207
9474	38	5	1.404	0.207
9461	40	1.2	0.394	0.244
5902	40	3	0.942	0.233
5714	40.1	1.8	0.586	0.241
6537	40.1	4	1.226	0.227
20658	40.7	2	0.656	0.243

Se procede a determinar su altura, partiendo del volumen y el radio de la tubería seleccionada:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (3.3)$$

$$h = \frac{V}{\pi * r^2} \quad (3.4)$$

$$h = \frac{229418 \text{ mm}^3}{\pi * (18.8\text{mm})^2}$$

$$h = 206.61 \text{ mm}$$

Establecido las medidas de las columnas de adsorción, se procede a comprobar la resistencia mecánica que tendrá en su trabajo. Para esto se empleará el código ASME sección VIII de

Calderas y Recipientes a Presión [51], específicamente en UG-28 “ESPESOR DE ENVOLVENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA”.

Se considera la columna de adsorción como una envolvente cilíndrica y se procede a determinar el esfuerzo circunferencial y el esfuerzo longitudinal, que rigen bajo las siguientes formulas:

$$P_{\max(cir)} = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (3.5)$$

Donde:

$P_{\max(cir)}$: Presión de trabajo máximo permisible en esfuerzo circunferencial.

S : Valor del esfuerzo máximo permisible.

t : Espesor.

E : Eficiencia de juntas.

R : Radio interior del contorno de la envolvente sometido a presión.

Y,

$$P_{\max(long)} = \frac{2SEt}{R - 0.4t} \quad (3.6)$$

Donde:

$P_{\max(long)}$: Presión de trabajo máximo permisible en esfuerzo longitudinal.

S : Valor del esfuerzo máximo permisible.

t : Espesor.

E : Eficiencia de juntas.

R : Radio interior del contorno de la envolvente sometido a presión.

Todos los parámetros son conocidos ($R = 37.6mm = 0.74plg$, $t = 1.2mm = 0.0472plg$) con excepción del esfuerzo máximo permisible y la eficiencia de juntas. El esfuerzo máximo permisible (S) es un parámetro propio de cada material, en este caso un UNS A91060 que para tubería según ASME Sección II Calderas y Recipientes a Presión es

de 1.700 psi (Anexo 1). La eficiencia de juntas (E) se obtiene de ASME Sección VIII Calderas y Recipientes a Presión el cual establece que $E = 1$ cuando el cilindro no posee costuras [51].

Para poder determinar el esfuerzo circunferencial, primero se debe verificar que la presión interna de diseño no exceda de $0.385 SE$:

$$P < 0.385 SE \quad (3.7)$$

$$30 \text{ psi} < 0.385 (1700\text{psi})(1)$$

$$30 \text{ psi} < 654.5 \text{ psi } \mathbf{Cumple}$$

Se determina la presión de trabajo máximo permisible en esfuerzo circunferencial:

$$P_{\max(cir)} = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

$$P_{\max(cir)} = \frac{(1700 \text{ psi})(1)(0.0472 \text{ plg})}{(0.74 \text{ plg}) + 0.6 (0.0472)}$$

$$P_{\max(cir)} = 104.44 \text{ psi}$$

Para poder determinar el esfuerzo longitudinal, primero se debe verificar que la presión interna de diseño no exceda de $1.25 SE$:

$$P < 1.25 SE \quad (3.8)$$

$$30 \text{ psi} < 1.25 (1700\text{psi})(1)$$

$$30 \text{ psi} < 2125 \text{ psi } \mathbf{Cumple}$$

Se determina la presión de trabajo máximo permisible en esfuerzo longitudinal:

$$P_{\max(long)} = \frac{2SEt}{R - 0.4t}$$

$$P_{\max(long)} = \frac{2(1700 \text{ psi})(1)(0.0472)}{(0.74) - 0.4 (0.0472)}$$

$$P_{\max(long)} = 222.54 \text{ psi}$$

Por último se determina el factor de seguridad, el cual James Gere establece como “La razón entre la resistencia real y la resistencia requerida” en [52], donde la resistencia de trabajo será la presión de trabajo que da el compresor de 30 *psi*:

$$n = \frac{\text{resistencia real}}{\text{resistencia de trabajo}} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{trabajo}}} \quad (3.9)$$

$$n = \frac{104.44 \text{ psi}}{30 \text{ psi}}$$

$$n = 3.48 \approx 3.5$$

Para evitar la falla el factor de seguridad debe ser superior a 1, sin embargo; cabe mencionar que cada código de diseño (ASME, B.S5500 o B.S.1515, JIS, alemán) posee su propio factor de seguridad, como por ejemplo el ASME usa un factor de seguridad de 3.5, mientras el B.S 1515 usa un factor de seguridad de 2.35 [53]. Por lo cual la tubería seleccionada cumple.

3.7.3 DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN MEDIANTE SOFTWARE.

Mediante el software Solid Works se diseña las columnas de adsorción (Figura 29), a partir de las dimensiones establecidas anteriormente.

Tabla 38. Características de las columnas de adsorción.

Característica	Valor
Diámetro interno (D_o)	37.6 mm
Espesor (t)	1.2 mm
Material	UNS A91060

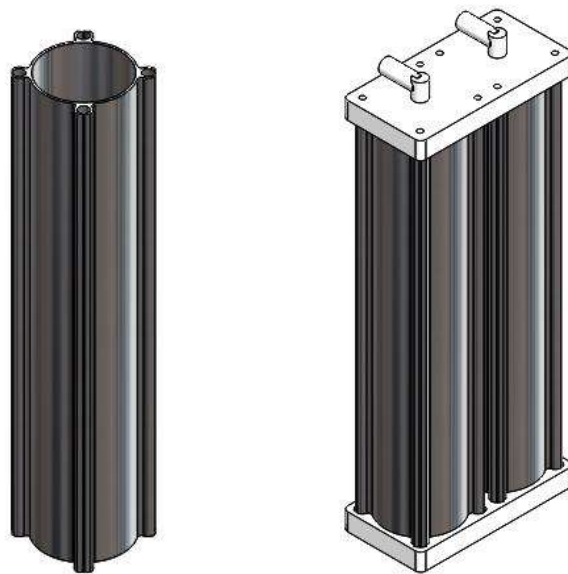


Figura 29. Columnas de adsorción del banco de pruebas.

3.7.3.1 SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN

Ya establecido el material, se procede a fijar los dos extremos de la columna de adsorción (Figura 30), esto debido a que se encontraría prácticamente empotrado en las tapas por donde se conecta las mangueras que transportan el aire y el oxígeno.



Figura 30. Extremos de la columna de adsorción fijados.

Se aplica la carga externa en el sólido (Figura 31), que en este caso sería la presión interna:

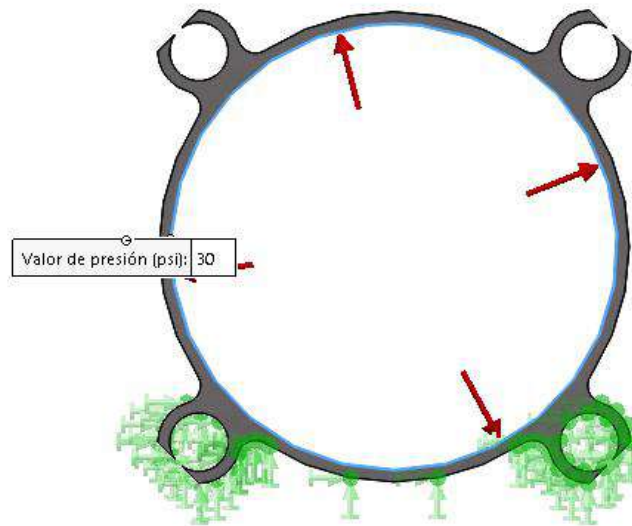


Figura 31. Aplicación de la presión interna máxima (30 psi) en el interior del cilindro.

Al ser una figura cilíndrica se aplica una malla por tetraedros (Figura 32) para mejores resultados:

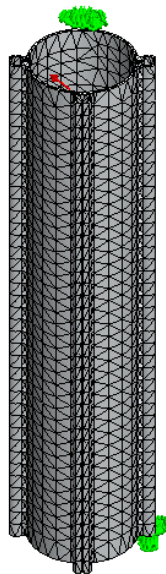


Figura 32. Mallado de la columna de adsorción.

Por último, se obtiene los resultados como tensiones máximas (Figura 33), deformaciones unitarias (Figura 34) y factor de seguridad (Figura 35):

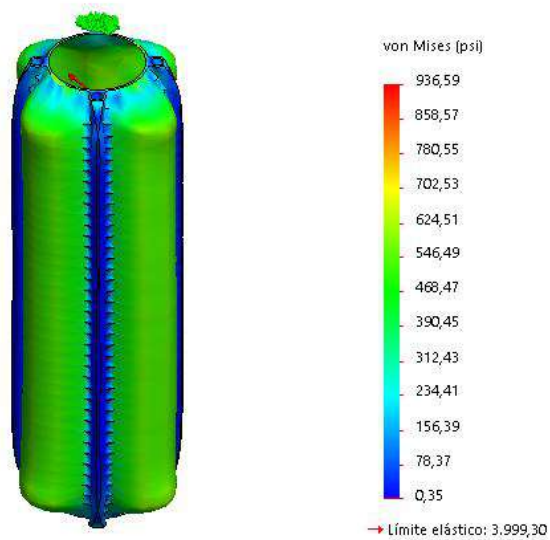


Figura 33. Tensiones máximas.

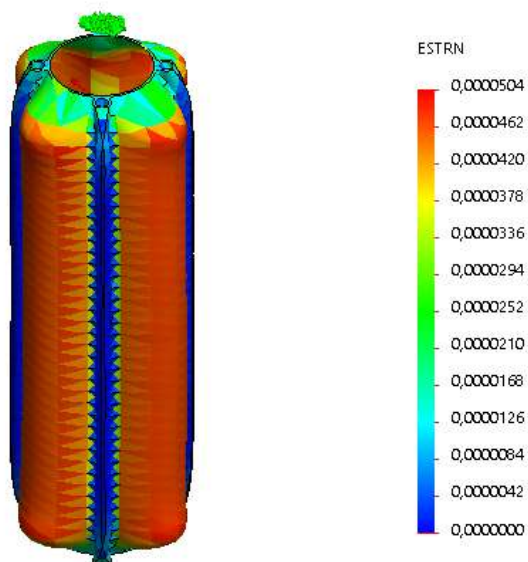


Figura 34. Deformaciones unitarias.

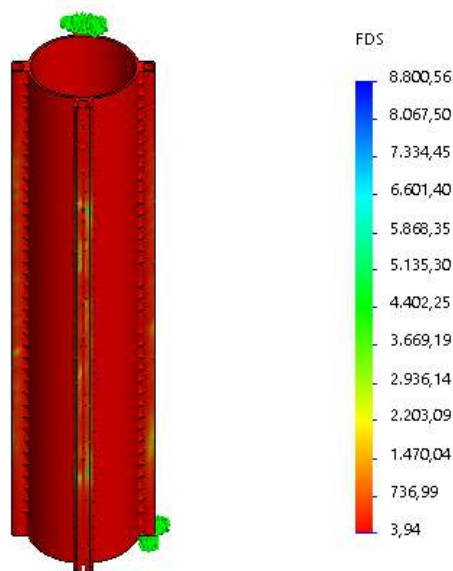


Figura 35. Factor de seguridad.

El factor de seguridad obtenido de la simulación ($n = 3.94$), permite corroborar el valor del factor de seguridad previamente determinado con el Código ASME Sección VIII ($n = 3.48$), por lo cual se afirma que la tubería a utilizar es la 9461 de Extrusax (Diámetro externo de 40 mm y espesor de 1.2 mm).

ETAPA IV: AUTOMATIZACION Y CONTROL DEL SISTEMA

3.8 PROGRAMACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA.

El sistema de control consta de varios circuitos: el circuito de alimentación, dos circuitos de fuerza, el circuito de regulación de caudal y el circuito de recolección de datos.

3.8.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

La alimentación del sistema se basa en una línea principal de 120V de corriente continua, que posee un interruptor para el encendido o apagado del sistema en general. Posterior al interruptor se encuentra conectado un tomacorriente que conecta dos cargadores uno de 5V para alimentar a los Arduinos y otro de 12v (relé 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8) para alimentar a los solenoides y al disipador de calor, por último, hay una línea directa de 120v (Relé 1) que alimenta al compresor (Figura 36).

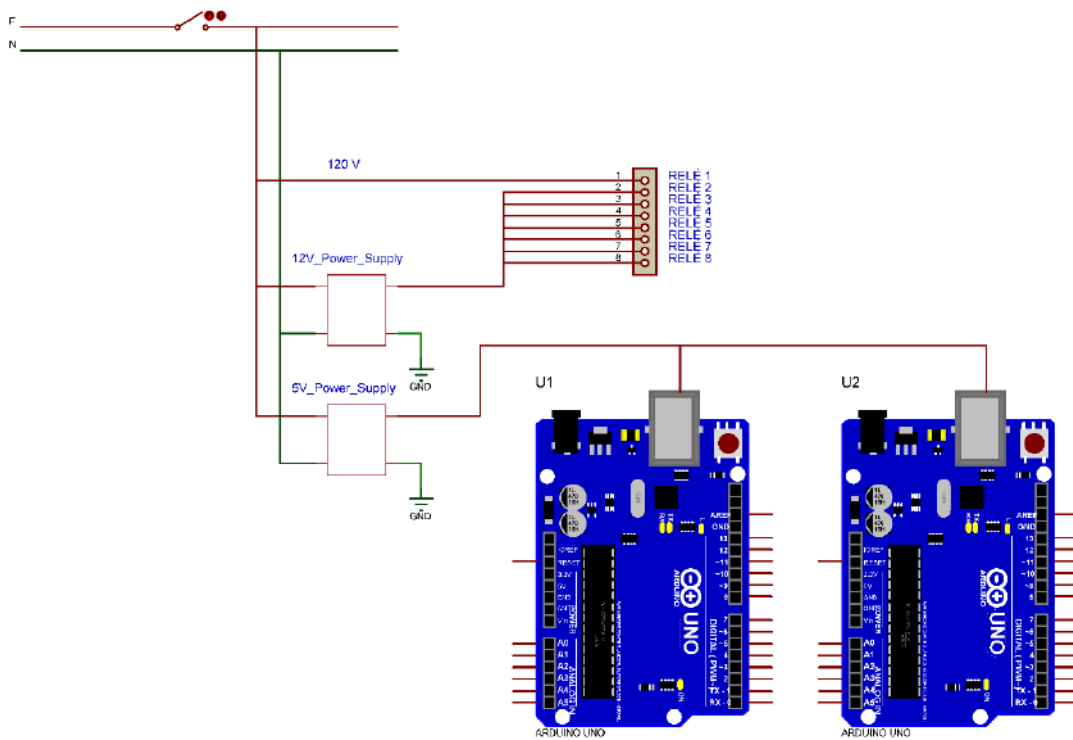


Figura 36. Circuito de alimentación del sistema concentrador de oxígeno.

3.8.2 CIRCUITO DE FUERZA

Este circuito permite que al accionar el pulsador (P1) entren en funcionamiento los relés 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, con lo cual van a operar componentes como el compresor (Compresor), el disipador de calor, válvula solenoide 1, válvula solenoide 2, válvula solenoide 3, válvula solenoide 4, válvula solenoide 5 y válvula solenoide 6 (Figura 37).

El funcionamiento de cada válvula solenoide se basa en periodos de tiempo secuenciales, esto con la finalidad de que el concentrador de oxígeno cumpla con el ciclo de Skarstrom de 4 etapas para producir oxígeno, la programación para este circuito de alimentación se detalla en el Anexo B.

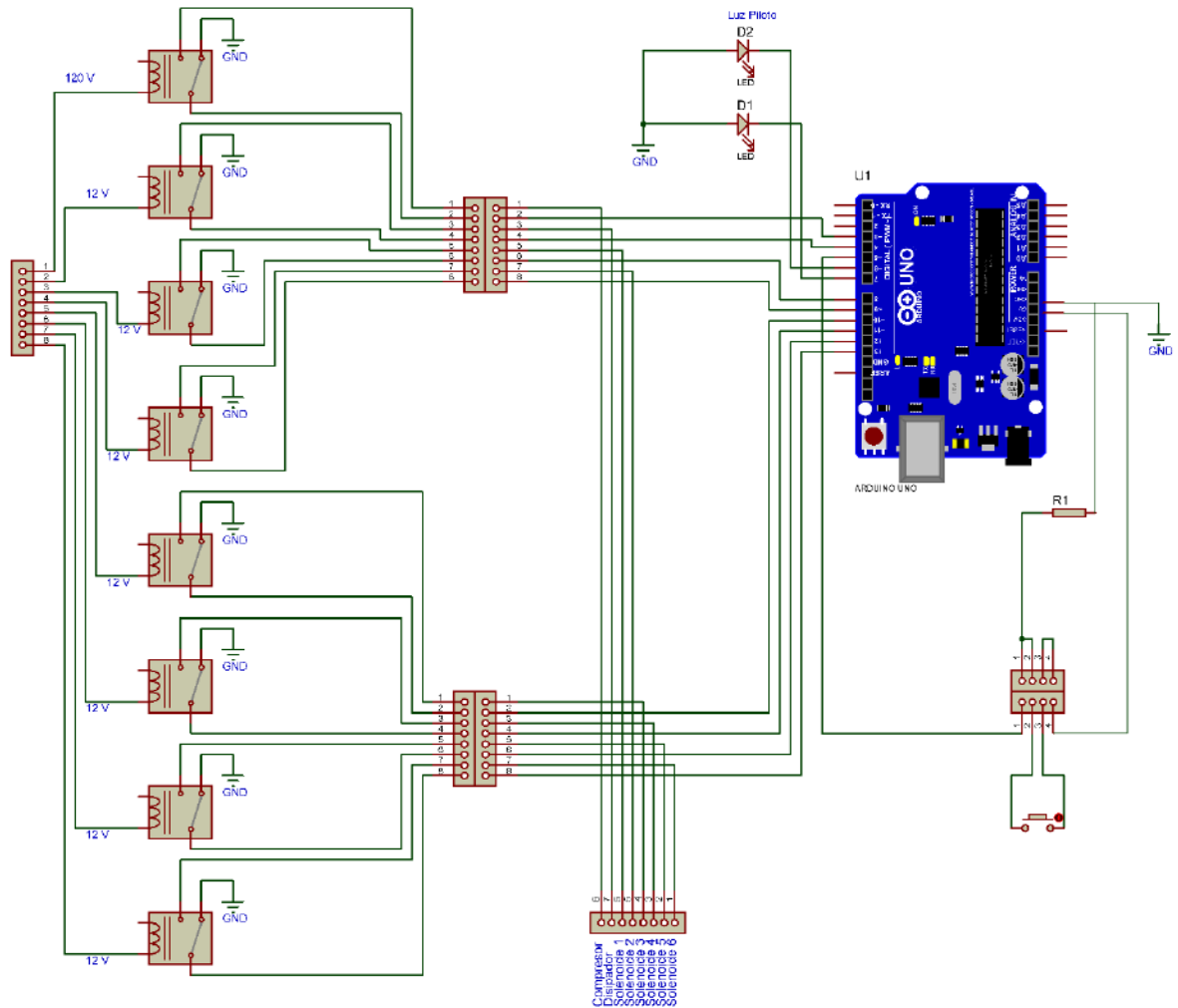


Figura 37. Circuito de fuerza del concentrador de oxígeno.

La Tabla 39 detalla la disposición de los pines del primer ARDUINO UNO en el circuito de fuerza:

Tabla 39. Disposición de los pines del Arduino UNO en el circuito de fuerza.

PINES UTILIZADOS				
PIN	ELEMENTO	ENTRADA/SALIDA	VOLTAJE	CORRIENTE
Pin 5	Pulsador (P1)	Entrada	5 V	C.C
Pin 6	LED 1	Salida	3 V	C.C
Pin 7	LED 2	Salida	3 V	C.C
Pin 3	RL1 (Relé 1)	Entrada	120 V	A.C
Pin 4	RL2 (Relé 2)	Entrada	12 V	C.C
Pin 8	RL3 (Relé 3)	Entrada	12 V	C.C
Pin 9	RL4 (Relé 4)	Entrada	12 V	C.C
Pin 10	RL5 (Relé 5)	Entrada	12 V	C.C
Pin 11	RL6 (Relé 6)	Entrada	12 V	C.C
Pin 12	RL7 (Relé 7)	Entrada	12 V	C.C
Pin 13	RL8 (Relé 8)	Entrada	12 V	C.C

Descripción del diagrama del circuito de fuerza

Pulsador (P1)

Posee un voltaje de entrada de 5V (C.C) a la resistencia de 10k, teniendo dos salidas; salida 1 hacia el pin 5 del Arduino Uno y la salida 2 hacia el pulsador, por lo tanto, el terminal restante del pulsador es negativo.

Luces indicadoras

Poseen un voltaje de entrada de 3V (C.C) al positivo de los leds se da mediante la señal del pin 9 o 10 y los negativos de los leds al GND del Arduino.

Relés

- Relé 1: Voltaje de entrada 120 v (A.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo del compresor.

- Relé 2: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo del disipador de calor.
- Relé 3: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 1.
- Relé 4: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 2.
- Relé 5: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 3.
- Relé 6: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 4.
- Relé 7: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 5.
- Relé 8: Voltaje de entrada 12 v (C.C), dirigido al pin 1 del relé, mientras que el pin 2 al GND del Arduino, el pin 3 hacia el Arduino, culminando con el pin 4 hacia el positivo de la válvula solenoide 6.

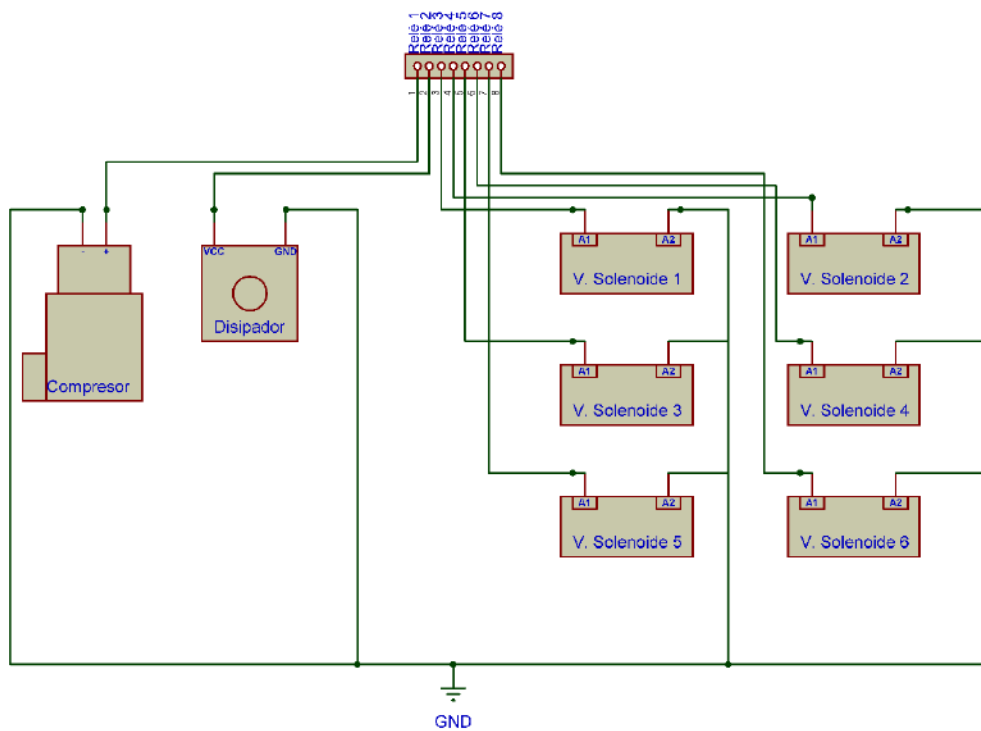


Figura 38. Conexión desde los relés al compresor, disipador de calor y válvulas solenoides.

Compresor

El positivo del compresor se conecta con el relé 1 y mediante la señal que brinda el Arduino lo impulsa al enclavamiento eléctrico, permitiéndole permanecer en funcionamiento mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo es alimentación con 120V de corriente alterna, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Disipador

El positivo del disipador se conecta con el relé 2 y mediante la señal del Arduino le impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo es alimentación con 12V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 1

El positivo del solenoide 1 se conecta con el relé 3 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras

que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 2

El positivo del solenoide 1 se conecta con el relé 4 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 3

El positivo del solenoide 2 se conecta con el relé 5 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 4

El positivo del solenoide 1 se conecta con el relé 6 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 5

El positivo del solenoide 2 se conecta con el relé 7 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

Solenoides 6

El positivo del solenoide 1 se conecta con el relé 8 y mediante una señal del Arduino lo impulsa a un enclavamiento eléctrico permaneciendo en funcionamiento, mientras que el negativo se conecta al neutro de la línea principal de alimentación. Es importante mencionar que el positivo funciona con una alimentación de 12 V de corriente continua, por lo que se usa un relé que permita operar con esa capacidad.

3.8.3 CIRCUITO DE REGULACIÓN DE CAUDAL

La regulación del caudal se la realiza mediante un motor a pasos y un cono de reducción de caudal. El motor a pasos se configuro con el flujo que ingresa proveniente de las columnas de adsorción y determinado número de pasos del motor mediante ensayos, dando como resultado la Tabla 40:

Tabla 40. Relación del número de impulsos con el flujo resultante posterior al motor a pasos.

Numero de impulsos	Flujo
0	1 LPM
409	2 LPM
818	3 LPM
1228	4 LPM
1638	5 LPM
2048	6 LPM

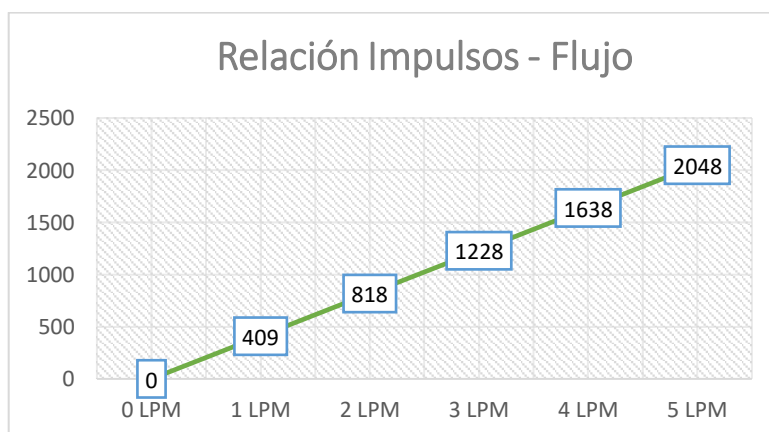


Figura 39. Grafica flujo (LPM) versus número de pasos del motor.

Este circuito permitirá controlar el flujo de oxígeno que se desea suministrar, contara con dos pulsadores (P1 y P2), los cuales aumentan o disminuyen el flujo de oxígeno mediante

una señal enviada por el Arduino, que aumentan o disminuyen el número de pasos del motor, según sea el pulsador accionado (Figura 40).

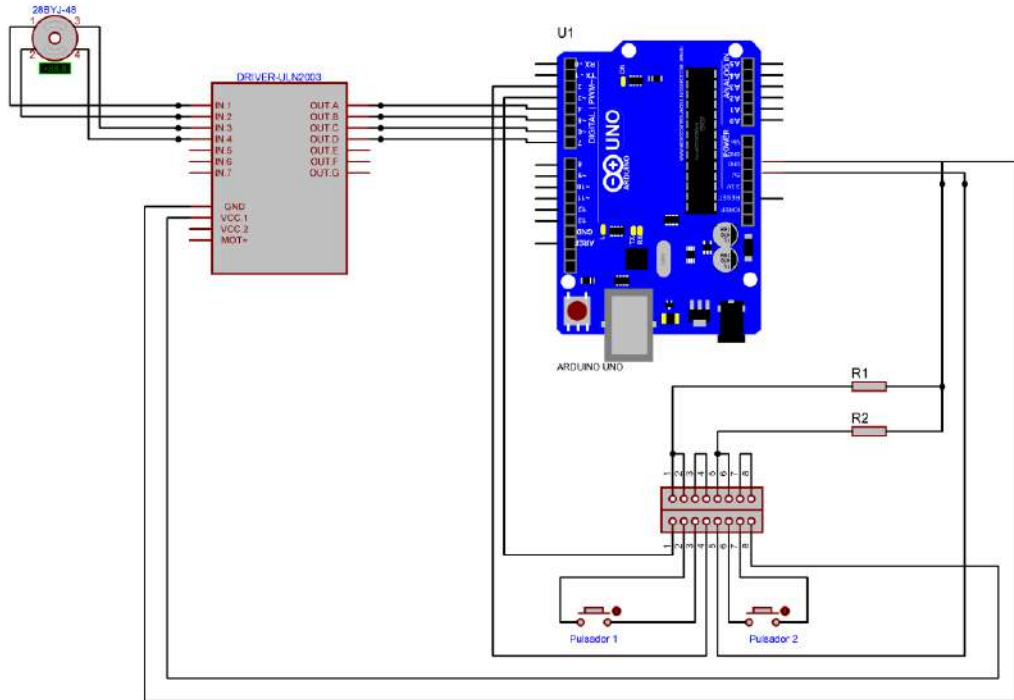


Figura 40. Circuito de regulación de caudal.

La disposición de los pines del segundo Arduino para regulación de caudal se detalla en la Tabla 41:

Tabla 41. Disposición de los pines del segundo Arduino en el circuito de regulación de caudal.

PINES UTILIZADOS				
PIN	ELEMENTO	ENTRADA/SALIDA	VOLTAJE	CORRIENTE
Pin 2	Pulsador (P1)	Entrada	5 V	C.C
Pin 3	Pulsador (P2)	Entrada	5 V	C.C
Pin 4	OUT A	Salida	5 V	C.C
Pin 5	OUT B	Salida	5 V	C.C
Pin 6	OUT C	Salida	5 V	C.C
Pin 7	OUT D	Salida	5 V	C.C

Descripción del circuito de regulación de caudal

Pulsador (P1)

Posee un voltaje de entrada 5 V (C.C) conectado a la resistencia de 10k, teniendo dos salidas; salida 1 hacia el pin 2 del Arduino Uno y la salida 2 hacia el pulsador, por lo tanto, el terminal restante del pulsador es negativo.

Pulsador (P2)

Posee un voltaje de entrada 5 V (C.C) conectado a la resistencia de 10k, teniendo dos salidas; salida 1 hacia el pin 3 del Arduino Uno y la salida 2 hacia el pulsador, por lo tanto, el terminal restante del pulsador es negativo.

Motor a pasos

Los pines 4, 5, 6, 7 del Arduino son datos de salida de tal forma que se pueda controlar al drive del motor dando movimientos rotaciones en pasos tanto horariamente como anti horariamente. Es importante mencionar que la alimentación del motor a pasos es de 5v de corriente continua y su negativo se conecta al GND del Arduino.

Drive

Los In 1, In 2, In 3, In 4 están conectado a las bobinas A, B, C, D para el control del motor a pasos.

3.8.4 CIRCUITO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Este circuito determinara el flujo que proporciona el sistema en tiempo real posterior al motor a pasos, que se encarga de regular el caudal. El caudal que ingrese al sensor hará girar una turbina, que emitirá pulsos eléctricos que leerá el segundo Arduino por medio del Pin 2 y los mostrara en la pantalla LED (Figura 41). La programación para la recolección de datos y regulación de caudal se encuentran en el Anexo B.

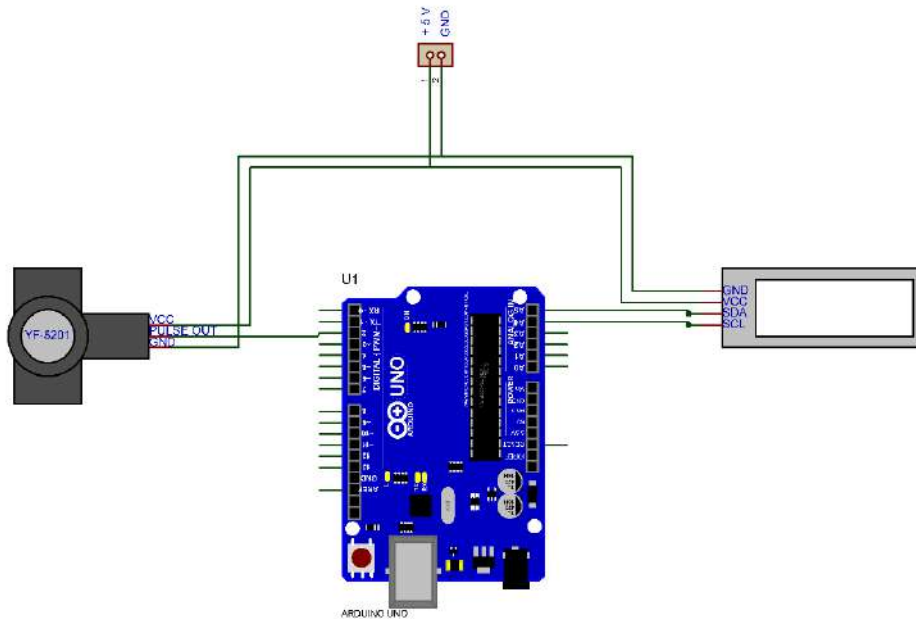


Figura 41. Circuito de recolección de datos.

La disposición de los pines del segundo Arduino se detalla en la Tabla 42:

Tabla 42. Disposición de los pines del Arduino UNO en el circuito de recolección de datos.

PINES UTILIZADOS				
PIN	ELEMENTO	ENTRADA/SALIDA	VOLTAJE	CORRIENTE
Pin 2	Sensor de flujo	Entrada	Señal	5V
A 4	SCL	Salida	Señal	5V
A 5	SDA	Salida	Señal	5V

Descripción del circuito de recolección de datos

Sensor de flujo

Contiene tres pines el primer pin GND está conectada al GND del Arduino, el pin Pulse Out está conectado al pin 2 del Arduino, para recibir datos de entrada y el pin VCC está conectada a 5v.

LCD

Contiene cuatro pines el primero pin GND está conectada al GND del Arduino, el pin VCC está conectado a 5v, el pin SDA está conectado al pin A5 y el pin SCL está conectado al pin A4.

Es importante mencionar para la emisión, transferencia y recepción de datos de un sensor a la pantalla LCD se utiliza el protocolo de comunicación I2C.

3.9 CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR DE OXIGENO

Diseños de planos

Los planos del sistema concentrador de oxígeno se desarrollaron en la plataforma SolidWorks, a partir de los datos obtenidos previamente, en los cuales se detallan dimensiones y materiales (Anexo E).

Montaje del banco de pruebas



Figura 42. Banco de pruebas del equipo concentrador de oxígeno.

3.10 COSTOS DE FABRICACIÓN.

Cabe recalcar que el analizador de oxígeno VN MkII seleccionado por su grado de precisión, fue un componente no encontrado de forma comercial en el país, por lo cual fue proporcionado por la Universidad Técnica de Ambato para realizar las mediciones.

Tabla 43. Costos de fabricación.

Material	Precio unidad	Cantidad	Precio total
Relé	\$0.95	8	\$7.60
Alambre de potencia	\$0.52	20	\$10.40
Terminal de carril hembra	\$0.20	10	\$2.00
Juego jumper mach/mach-hem-mach	\$3.40	4	\$13.60
Válvulas solenoides	\$11.90	6	\$71.40
Placa perforada	\$3.25	2	\$6.50
Manguera	\$1.40	5	\$7.00
Acoples en T	\$2.75	7	\$19.25
Abrazaderas	\$0.25	10	\$2.50
Correas plásticas	\$1.00	1,25	\$1.25
Acoples reductores	\$3.00	16	\$48.00
Bornera 4 pines	\$1.80	4	\$7.20
Resistencia	\$0.10	10	\$1.00
Estaño	\$0.40	5	\$2.00
Barra de silicón	\$0.15	10	\$1.50
Bornera 12 pines	\$1.55	1	\$1.55
Cinta aislante	\$1.00	1	\$1.00
Manquera espiral	\$0.45	7	\$3.15
Alambre de timbre	\$0.35	1	\$0.35
Fuente de poder	\$17.60	1	\$17.60
Arduino UNO	\$13.90	2	\$27.80
Pantalla LCD	\$11.40	1	\$11.40
Pulsadores	\$0.92	3	\$2.76
Modulo / Banco de pruebas	\$20.00	1	\$20.00
Espuma para filtro	\$1.20	1	\$1.20
Tornillos y platinas	\$2.60	1	\$2.60
Led	\$0.10	2	\$0.20
Terminal Arduino	\$1.10	2	\$2.20
Sensor de flujo	\$8.90	1	\$8.90
Motor a pasos y driver	\$6.90	1	\$6.90
Switch	\$0.65	1	\$0.65
Terminales	\$1.30	2	\$2.60
Impresiones 3D	\$22.00	1	\$22.00
Zeolita	\$200.00	1	\$200.00
Compresor	\$225.00	1	\$250.00
Columnas	\$60.00	1	\$60.00
Disipador de calor	\$3.60	1	\$3.60
Costo total			\$847.66

ETAPA V: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL ESTUDIO REFERENTE A LA NORMA ISO 80601-2-69.

3.11 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

Para comprobar el funcionamiento del equipo se utilizó un analizador de oxígeno de alta precisión, específicamente el VN202 MkII de Vandagraph Ltd. El cual permitió realizar varias mediciones a diferentes flujos, con la finalidad de obtener una ecuación que explique el funcionamiento del sistema.

El primer paso para tomar las medidas del oxígeno es configurar el analizador en un porcentaje de 20.9%, antes de acoplarlo al equipo para resultados más certeros (Tablas 44-48). La toma de valores de concentración de oxígeno se encuentra en el anexo D:

Pruebas a 1 lpm

Tabla 44. Concentración de oxígeno a 1 LPM.

A 1 LPM	
Flujo (lpm)	% de oxígeno
0.94	94.40%
0.98	93.80%
1.02	93.10%
1.08	92.60%
1.24	92.10%

Mediante regresión logarítmica (Figura 43), lineal (Figura 44) y exponencial (Figura 45) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno a 1 LPM:

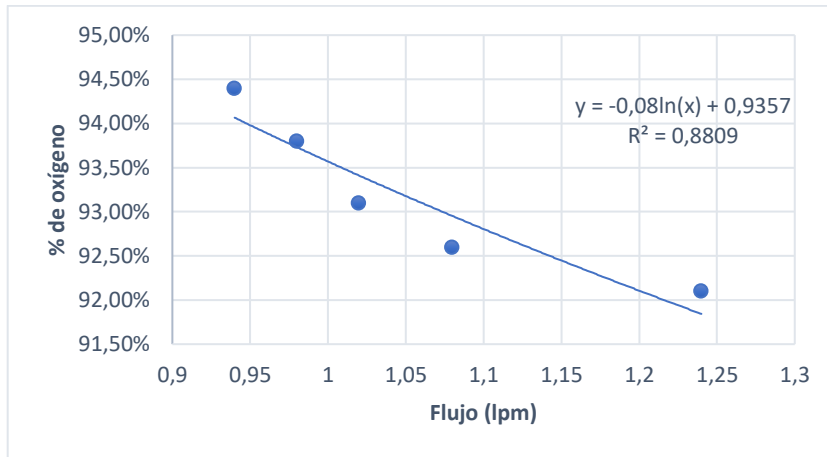


Figura 43. Regresión con tendencia logarítmica con 1 lpm.

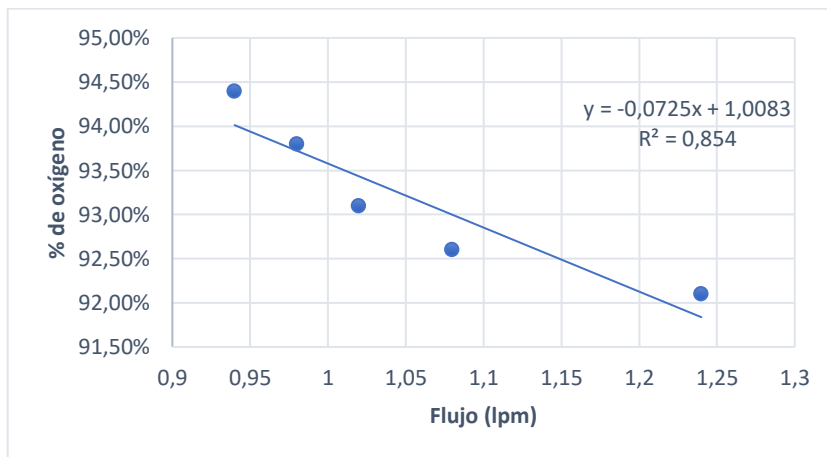


Figura 44. Regresión con tendencia lineal con 1 lpm.

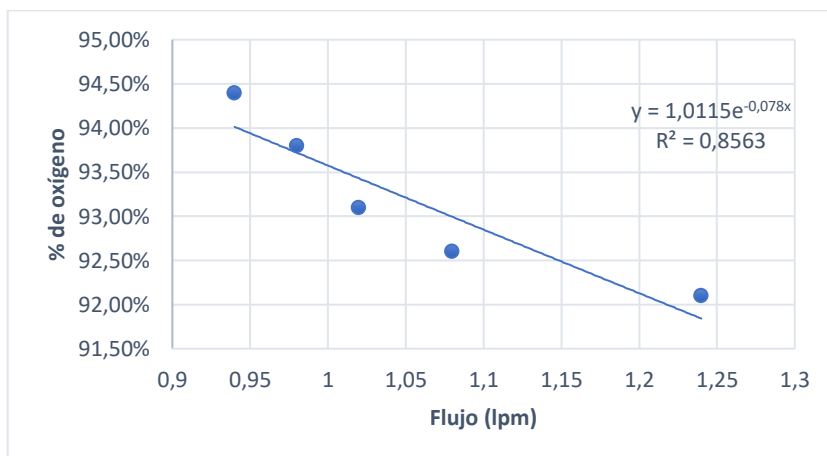


Figura 45. Regresión con tendencia exponencial con 1 lpm.

Como se puede observar en la Figura 43 el valor la tendencia logarítmica es la que más se acerca a la unidad, por lo que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno a 1 lpm será:

$$y = -0.08 \ln(x) + 0.9357 \quad (3.10)$$

Reemplazando se obtendrá la concentración de oxígeno a 1 lpm:

$$y = -0.08 \ln(1) + 0.9357$$

$$y = 93.57\%$$

Pruebas a 2 lpm

Tabla 45. Concentración de oxígeno a 2 LPM.

A 2 LPM	
Flujo (lpm)	% de oxígeno
1.93	91.50%
1.97	91.20%
2.05	90.60%
2.09	89.90%
2.16	89.20%

Mediante regresión logarítmica (Figura 46), lineal (Figura 47) y exponencial (Figura 48) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno a 2 LPM:

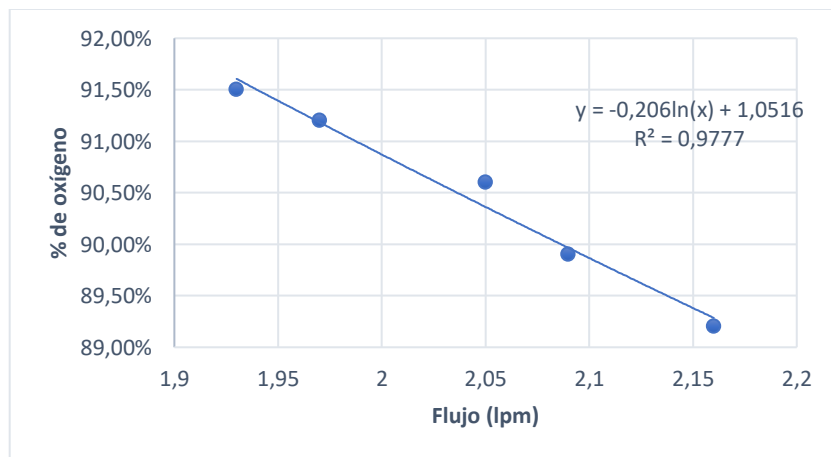


Figura 46. Regresión con tendencia logarítmica con 2 lpm.

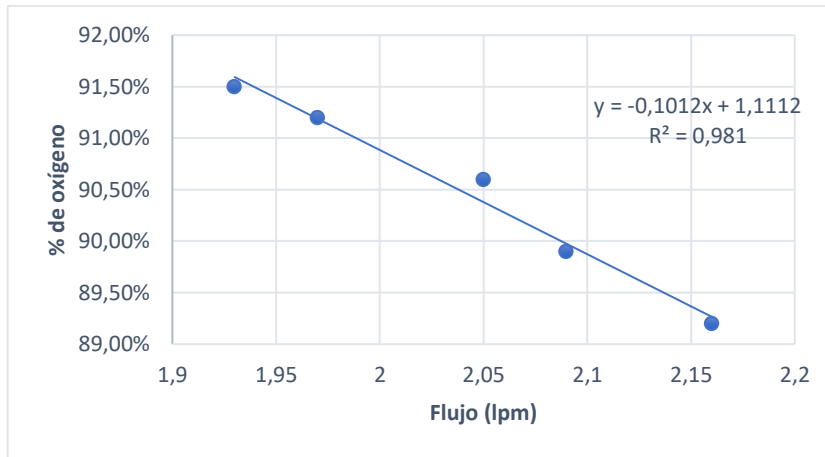


Figura 47. Regresión con tendencia lineal con 2 lpm.

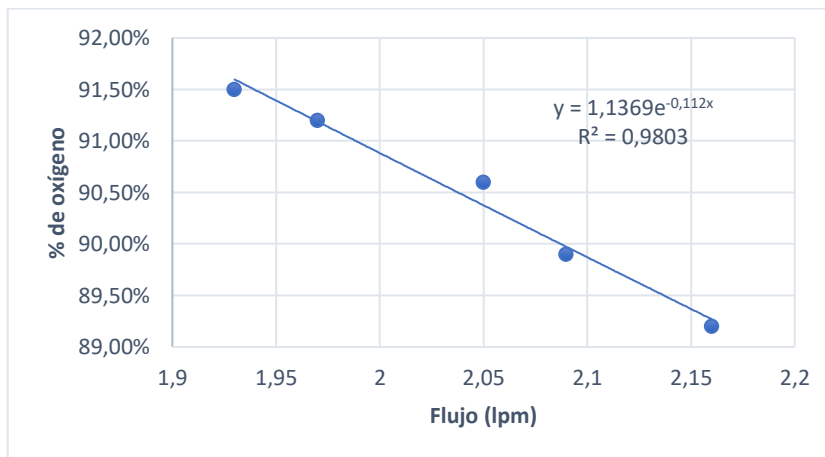


Figura 48. Regresión con tendencia exponencial con 2 lpm.

Como se puede observar en la Figura 47 el valor de la tendencia lineal es la que más se acerca a la unidad, por lo que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno a 2 lpm será:

$$y = -0.1012x + 1.1112 \quad (3.11)$$

Reemplazando se obtendrá la concentración de oxígeno a 2 lpm:

$$y = -0.1012(2) + 1.1112$$

$$y = 90.88\%$$

Pruebas a 3 lpm

Tabla 46. Concentración de oxígeno a 3 LPM.

A 3 LPM	
Flujo (lpm)	% de oxígeno
2.85	88.60%
2.97	88.00%
3.08	87.50%
3.11	87.10%
3.14	87.00%

Mediante regresión logarítmica (Figura 49), lineal (Figura 50) y exponencial (Figura 51) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno a 3 LPM:

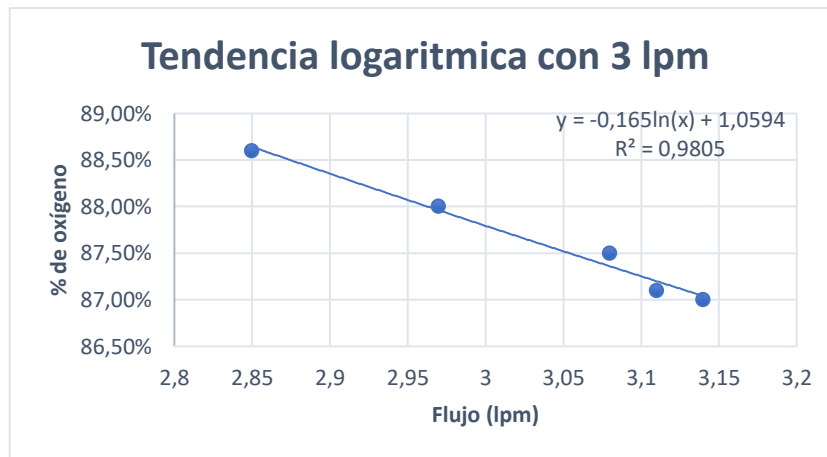


Figura 49. Regresión con tendencia logarítmica con 3 lpm.

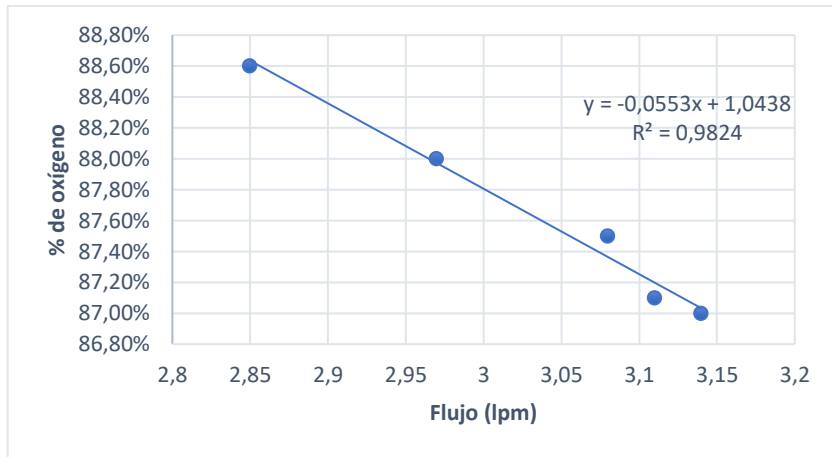


Figura 50. Regresión con tendencia lineal con 3 lpm.

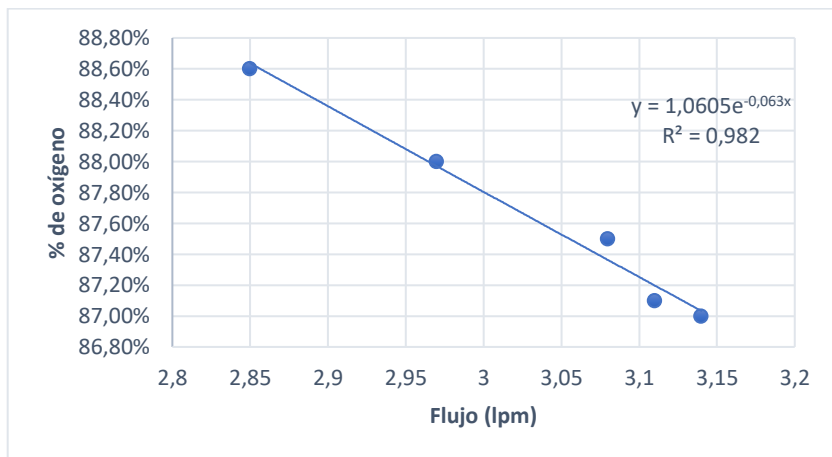


Figura 51. Regresión con tendencia exponencial con 3 lpm.

Como se puede observar en la Figura 50 el valor de la tendencia lineal es la que más se acerca a la unidad, por lo que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno a 3 lpm será:

$$y = -0.0553x + 1.0438 \quad (3.12)$$

Reemplazando se obtendrá la concentración de oxígeno a 3 lpm:

$$y = -0.0553(3) + 1.0438$$

$$y = 87.81\%$$

Pruebas a 4 lpm

Tabla 47. Concentración de oxígeno a 4 LPM.

A 4 LPM	
Flujo (lpm)	% de oxígeno
3.90	86.10%
3.94	85.50%
4.08	85.30%
4.11	85.00%
4.13	84.60%

Mediante regresión logarítmica (Figura 52), lineal (Figura 53) y exponencial (Figura 54) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno a 4 LPM:

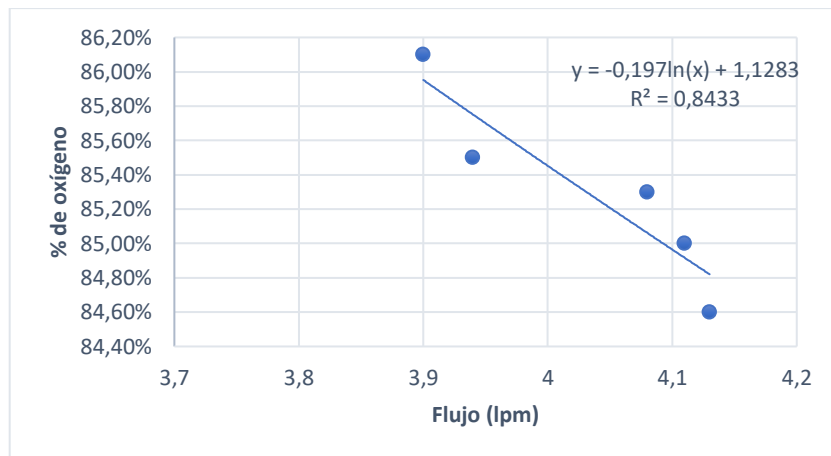


Figura 52. Regresión con tendencia logarítmica con 4 lpm.

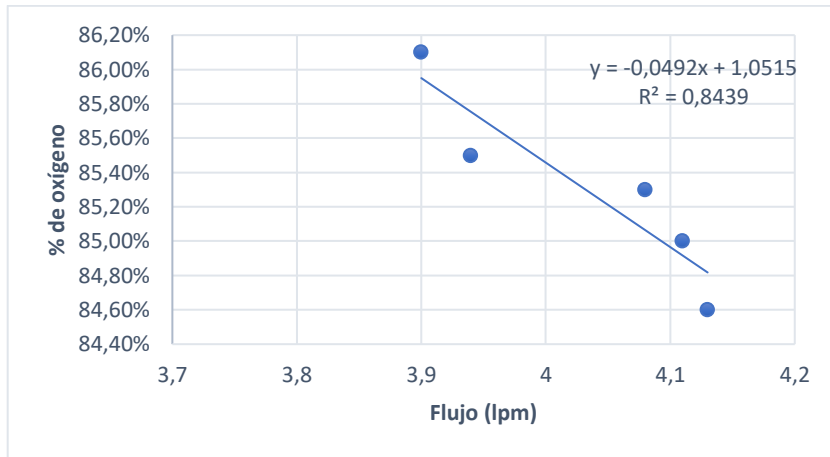


Figura 53. Regresión con tendencia lineal con 4 lpm.

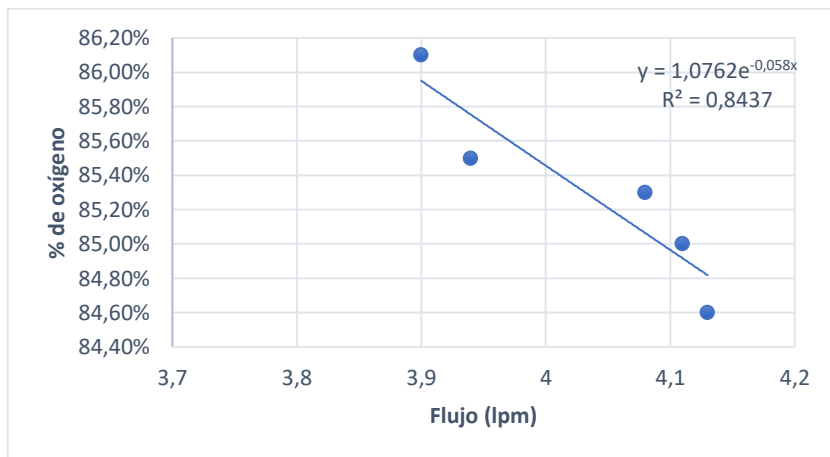


Figura 54. Regresión con tendencia exponencial con 4 lpm.

Como se puede observar en la Figura 53 el valor la tendencia lineal es la que más se acerca a la unidad, por lo que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno a 4 lpm será:

$$y = -0.0492x + 1.0515 \quad (3.13)$$

Reemplazando se obtendrá la concentración de oxígeno a 4 lpm:

$$y = -0.0492(4) + 1.0515$$

$$y = 85.34\%$$

Pruebas a 5 lpm

Tabla 48. Concentración de oxígeno a 5 LPM.

A 5 LPM	
Flujo (lpm)	% de oxígeno
4.75	84.30%
4.80	83.90%
4.95	83.50%
5.12	83.40%
5.23	82.10%

Mediante regresión logarítmica (Figura 55), lineal (Figura 56) y exponencial (Figura 57) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno a 5 LPM:

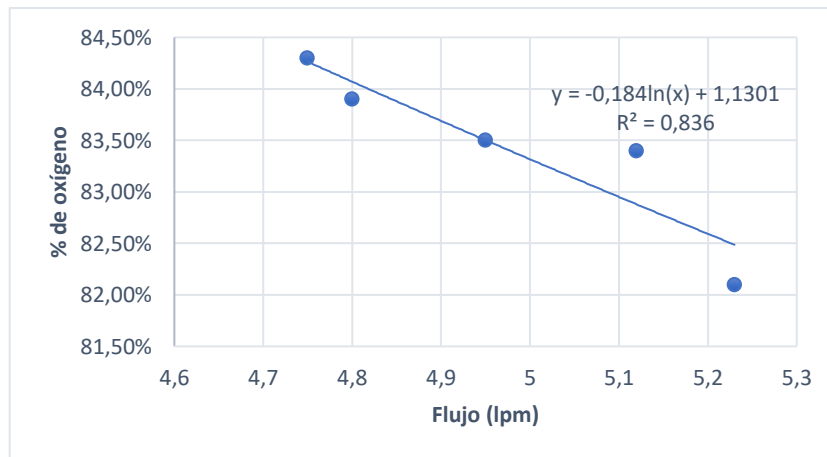


Figura 55. Regresión con tendencia logarítmica con 5 lpm.

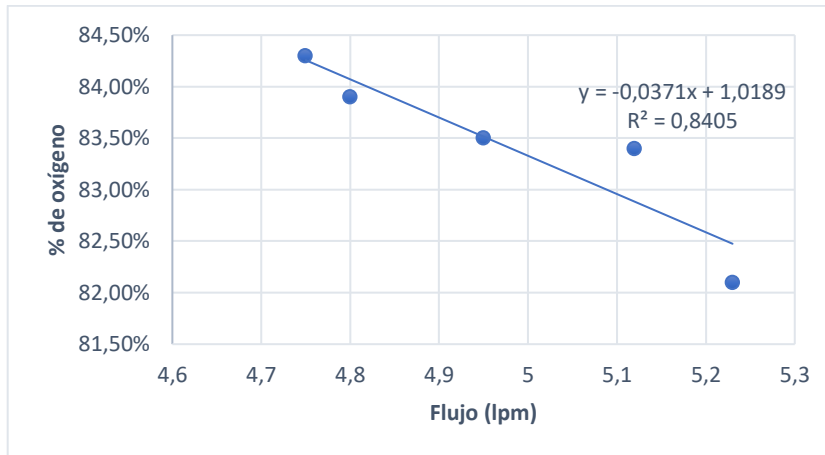


Figura 56. Regresión con tendencia lineal con 5 lpm.

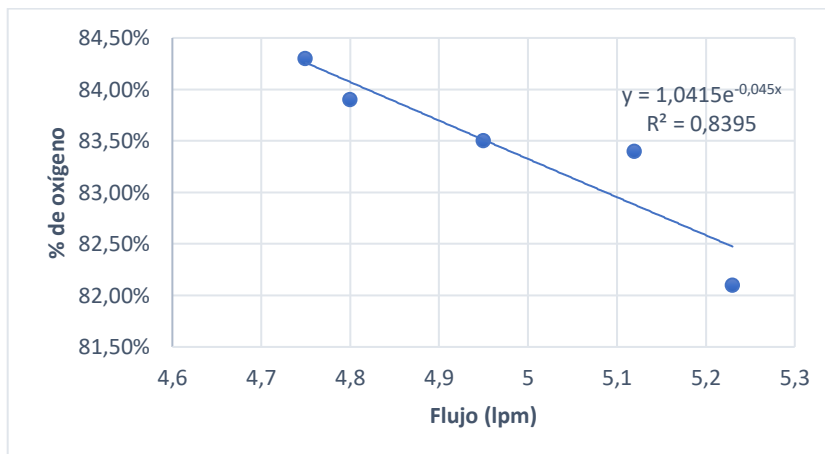


Figura 57. Regresión con tendencia exponencial con 5 lpm.

Como se puede observar en la Figura 56 el valor de la tendencia lineal es la que más se acerca a la unidad, por lo que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno a 5 lpm será:

$$y = -0.0371x + 1.0189 \quad (3.14)$$

Reemplazando se obtendrá la concentración de oxígeno a 4 lpm:

$$y = -0.0371(5) + 1.0189$$

$$y = 83.34\%$$

La tabla 49 indica el valor de concentración de oxígeno para cada flujo desde 1 hasta 5 lpm empleando las ecuaciones antes determinadas mediante las gráficas:

Tabla 49. Concentración de oxígeno a diferentes flujos del banco de pruebas de concentrador de oxígeno.

Interpolado	
Flujo (lpm)	% oxígeno
1	93.57%
2	90.88%
3	87.81%
4	85.34%
5	83.34%

Mediante regresión logarítmica (Figura 58), lineal (Figura 59) y exponencial (Figura 60) se determina cual es la línea de tendencia que más se acerque a R igual a 1, para hallar una ecuación y tener un valor más preciso de la concentración de oxígeno en este sistema:

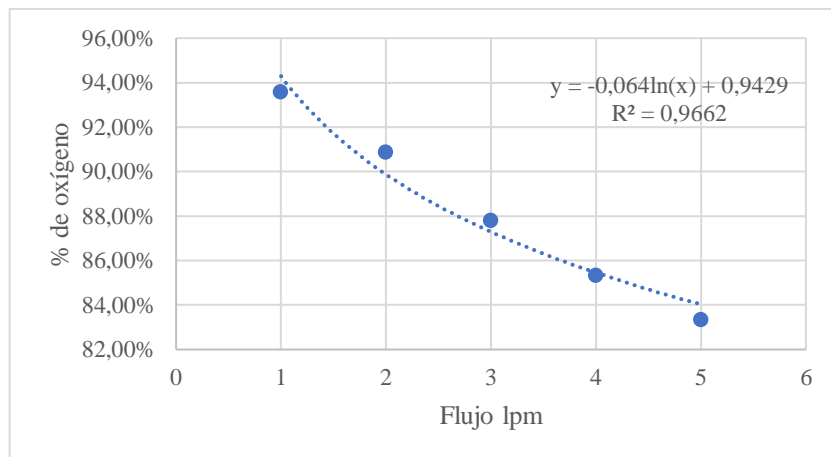


Figura 58. Regresión con tendencia logarítmica para flujos de 1 hasta 5 lpm.

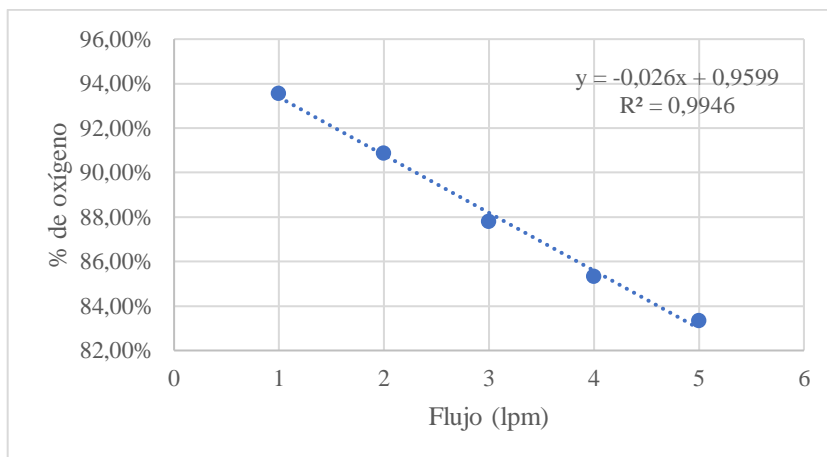


Figura 59. Regresión con tendencia lineal para flujos de 1 hasta 5 lpm.

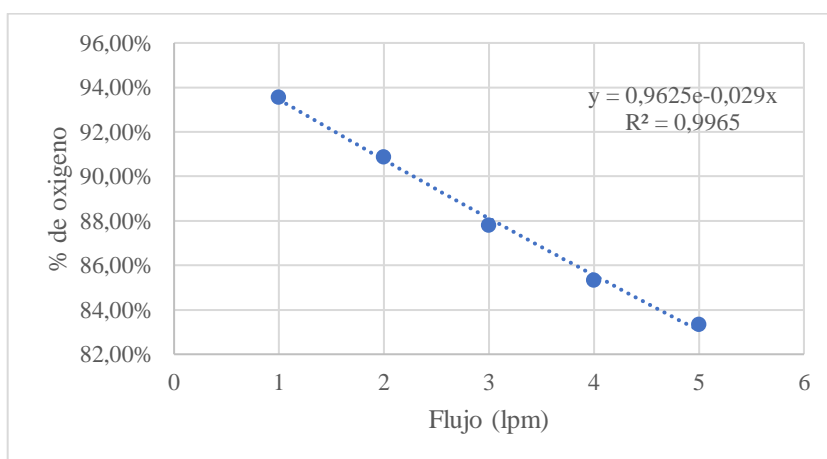


Figura 60. Regresión con tendencia exponencial para flujos de 1 hasta 5 lpm.

La línea de tendencia que más se aproximó a la unidad fue la exponencial (Figura 60), por lo cual se podría afirmar que el banco de pruebas funciona correctamente al superar el rango mínimo de concentración de oxígeno en todos sus flujos y que la ecuación para determinar la concentración de oxígeno en cualquier flujo del banco de pruebas es:

$$y = 0,9625e^{-0,029x} \quad (3.15)$$

3.12 VALIDACIÓN DE DATOS DEL PROTOTIPO CONCENTRADOR DE OXÍGENO RESPECTO A LA NORMA ISO 80601-2-69.

Tabla 50. Validación de datos del banco de pruebas respecto a la norma ISO 80601-2-69.

Requisitos ISO 80601-2-69	Valores o indicaciones	Observaciones del banco de pruebas
Salidas de oxígeno	1 o 2	1
Eficiencia eléctrica	< 70W x lpm	-
Interfaz de usuario sencilla	Pantalla con valores de flujo, concentración de oxígeno y sistema para regulación	Cumple
Alarmas	Concentración, interrupción de flujo, presión alta o baja, batería baja, corte de luz, temperatura elevada	-
Indicador de horas de funcionamiento	Cronometro digital o analógico	Digital
Salidas de oxígeno	Salida con conexión de 1/4 de pulgada o equivalente	Cumple
Flujómetro	Tasa de flujo mínima de 0,5 lpm	1 lpm
Monitor de oxígeno	Indicar cuando la concentración sea menor al 82%	No cumple
Nivel de ruido	<50 dB (A)	60 dB (A)

CAPITULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La pureza del oxígeno suministrado varía de acuerdo con los flujos con los que trabaje el concentrador, existiendo una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros, es decir, a medida que el flujo aumente la concentración de oxígeno disminuirá.
- Con el diseño propuesto se pudo realizar un correcto proceso PSA (utilizando el ciclo de Skarstrom de 4 etapas); sin embargo, implicó ocupar más espacio y, por ende, existe más pérdidas de flujo de aire.
- El dimensionamiento de las columnas de adsorción se determinó bajo el código internacional ASME sección VIII para recipientes a presión, dando un factor de seguridad teórico de 3.48 (Ecuación 3.9) y comprobando mediante software (Figura 48).
- El equipo construido cumple con los valores de concentración de oxígeno establecido en la norma ISO 80601-2-69, sin embargo; sus flujos que suministra son en intervalos de 1 y no de 0.5 como establece la norma.
- Utilizando análisis por regresiones con valores de flujos y concentraciones de oxígeno (Tabla 47), se logró determinar la ecuación 3.9 para determinar el grado de concentración de oxígeno en este sistema.
- En la parte de construcción, al hacerlo como un banco de pruebas se deja todos sus componentes a simple vista, entre ellos, el compresor. Que, a pesar de ser de los más silenciosos del mercado, requiere una caja de aislamiento acústico para evitar superar el ruido permitido en la norma ISO 80601-2-69.
- Parte de los componentes usados para la elaboración de este concentrador de oxígeno son escasos en el país, tales como: compresor de doble pistón libre de aceite y el analizador de oxígeno; o materiales como la zeolita 13X, lo cual retrasa y aumenta el valor de la construcción de un concentrador de oxígeno, frente a la importación de un modelo comercial.

- De cara a futuros estudios, sería conveniente construir un componente que reemplace al arreglo de válvulas, para distribuir los flujos de aire, oxígeno y aire sin oxígeno, con la finalidad de elaborar un concentrador de oxígeno compacto.

4.2 RECOMENDACIONES

- Para evitar el recalentamiento del compresor después de mucho tiempo de trabajo, se recomienda colocar un disipador de calor en su base.
- Se debe evitar fugas en el sistema para impedir pérdidas de flujo en la salida, especialmente en las uniones de las mangueras de polivinilo, de preferencia asegurándolos con abrazaderas plásticas o metálicas.
- Cuando se diseña mediante normas o códigos, se recomienda hacer un análisis o simulación mediante software para comparar valores y garantizar seguridad.
- Antes de automatizar el sistema, es importante establecer una lógica de programación que permita agilizar su construcción.
- Al momento de diseñar, verificar que las normas, códigos o especificaciones sean lo más actuales posibles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Erickson, “Variaciones en el oxígeno en la atmósfera de la Tierra alteraron significativamente el clima global a través de la historia del planeta,” *ESPAÑOL UNIVERSITY OF MICHIGAN*, Jun. 2015. .
- [2] El comercio, “El oxígeno medicinal es escaso en tres provincias,” *EL COMERCIO*, Ecuador, Apr. 2021.
- [3] P. Uchua, “Coronavirus: cómo la covid-19 está causando una ‘crisis de oxígeno’ en América Latina y algunos países en desarrollo,” *BBC World Service*, Jan. 2021.
- [4] R. Pérez, “La crisis del oxígeno en la pandemia, explicada,” *The New York Times*, May 2021.
- [5] G. Coba, “Ecuador ha exportado USD 447.000 en oxígeno medicinal durante 2021,” *PRIMICIAS*, Ecuador, 2021.
- [6] AFP, “El drama de la falta de oxígeno para muchos enfermos de covid-19 en América Latina,” *FRANCE 24*, Montevideo, Feb. 2021.
- [7] OMS, “Especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno.” 2016.
- [8] W. Cristancho Gómez, *Oxígeno: fisiología, terapéutica, toxicidad*. 2019.
- [9] C. Pellini, “COMPOSICION DEL AIRE, PROPIEDADES, CARACTERISTICAS E IMPORTANCIA,” 2014. https://historiaybiografias.com/aire_agua03/.
- [10] M. Boldrini and G. Palacios, *Generador de Oxígeno para uso Hospitalario*. 2019.
- [11] A. Lopez, A. Faninthon, and A. Medina, “Concentrador de oxígeno a bajo costo para uso de oxigenoterapia, bajo la Norma ISO 80601-2-69 de uso domiciliario en zona rurales del país, en el segundo semestre 2020.” Managua, Oct. 2020.
- [12] M. Rosell, R. Galloso, and B. Calvo, “Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones,” vol. 117, no. 4, pp. 783–792, 2006.
- [13] J. Z. J. H. and S. P. R. M., “Possibilities of Utilization Zeolite in Concrete.” Apr. 2015.
- [14] E. F. Morante Carballo, “LAS ZEOLITAS DE LA COSTA DE ECUADOR (GUAYAQUIL): GEOLOGÍA , CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES,” 2004.

- [15] World Health Organization, “Pocket book of hospital care for children: guidelines for the management of common childhood illnesses,” 2013.
- [16] World Health Organization, “Oxygen therapy for children: a manual for health workers,” 2016.
- [17] Ingeniería Mecafenix, “Compresor reciprocante o de pistón.” Mar. 2019.
- [18] C. Pneumatic, “Guía para el tratamiento del aire comprimido,” *Chicago Pneumatic*, Dec. 2020.
- [19] Medigas, “Filtro de entrada de espuma para concentrador de oxígeno SYSMED M50.” .
- [20] Arco, “Por qué la válvula de bola es la más utilizada en fontanería,” Mar. 2019.
- [21] TUVALREP, “Válvula de Cortina Pegler Yorkshire.” .
- [22] Intersurgical, “Filtros HEPA, pre-filtros de foam y accesorios para concentradores de oxígeno,” *INTERSURGICAL PRODUCTOS MEDICOS DESECHABLES*, 2021. .
- [23] OXYMASTER CORP, “COLUMNAS DE REEMPLAZO PARA INOGEN EN CASA CONCENTRADOR DE OXIGENO ESTACIONARIO,” *OXYMASTER CORP*, 2018. .
- [24] SINC MED, “JIANGSU SINC MEDICAL DEVICE CO., LTD.,” *Alibaba.com*, 2022. .
- [25] CHEMXIN, “13X Molecular Sieve,” *CHEMXIN Network Studio*, 2018. .
- [26] P. Lopez, “Reguladores de oxígeno o caudalímetros,” *imiberomed*, Feb. 2018. .
- [27] Naylamp Mechatronics SAC, “VÁLVULA SOLENOIDE 3/4" 12VDC,” *Naylamp Mechatronics*, 2022. <https://naylampmechatronics.com/valvulas/826-valvula-solenoid-3p4-pulg-12vdc.html> (accessed Apr. 12, 2022).
- [28] M. Electronics, “Arduino UNO.” <https://arduino.cl/arduino-uno/>.
- [29] H. QuinLu, “Detector de pureza de O2 portátil médico, analizador de Gas y oxígeno, de 0 a 100% VOL, superventas,” *Alibaba.com*, 2022. .
- [30] SERVEI ESTACIÓ, “Manguera de silicona alimentaria: características, usos y

- aplicaciones,” *SERVEI ESTACIÓ*, 2019. .
- [31] G. Bruno, “ANALISIS DE DECISIONES.” https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap2.pdf.
- [32] A. Capote, “DISEÑO DE UN GENERADOR DE OXÍGENO PARA SU APLICACIÓN EN PISCICULTURA.” BOGOTÁ, 2018.
- [33] P. Guerin de Montgareuil and D. Dominé, “PROCESS FOR SEPARATING A BINARY GASEOUS MIXTURE BY ADSORPTION,” Paris, 772,961, 1957. [Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9e/5d/ad/16be505fbca4db/US3155468.pdf>.
- [34] J.-G. Lee, S.-J. Lee, and C.-H. Lee, “No Title Comparison of the Adsorption Dynamics of Air on Zeolite 5A and Carbon Molecular Sieve Beds.” Department of Chemical Engineering, 2004, [Online]. Available: <https://www.cheric.org/PDF/KJChE/KC21/KC21-6-1183.pdf>.
- [35] M. Mofarahi and E. J. Shokroo, “COMPARISON OF TWO PRESSURE SWING ADSORPTION PROCESSES FOR AIR SEPARATION USING ZEOLITE 5A AND ZEOLITE 13X.” *Petroleum & Coal*, 2013, [Online]. Available: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/07/pc_3_2013_javadi_221.pdf.
- [36] Xi’an Lvneng Purification Technology Co. Ltd., “Zeolita tamiz molecular densidad 13x concentrador de oxígeno de polietileno para secar co2, agua,” *Alibaba.com*, 2022. https://spanish.alibaba.com/p-detail/XINTAO-1600200876872.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.392f96a1ojvFLX&s=p (accessed Apr. 29, 2022).
- [37] DILIGENT, “Arty S7,” *DIGILENT REFERENCE*, 2022. <https://digilent.com/reference/programmable-logic/arty-s7/start> (accessed Mar. 22, 2022).
- [38] Arduino, “Arduino UNO & Genuino UNO,” *Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno> (accessed Feb. 23, 2022).

- [39] Raspberrypi, “Raspberrypi 3 Model B,” *Raspberrypi*, 2022. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-3-model-b/>.
- [40] Gleeman, “100W de bajo ruido pequeña Mini Oilless pistón compresor de aire Portable compresor de aire sin aceite la cabeza de concentrador de oxígeno 1L,” *MAde-in-China*, 2022. https://es.made-in-china.com/co_gleeman8090/product_100W-Low-Noise-Small-Mini-Oilless-Air-Compressor-Piston-Portable-Oil-Free-Air-Compressor-Head-for-1L-Oxygen-Concentrator_uogeeouyg.html (accessed Apr. 12, 2022).
- [41] Tiendamia, “85W Quiet Oilless Vacuum Pump 110V w/ -86KPA Ultimate Pressure 25L/MIN Air Flow,” *Tiendamia*, 2022. <https://tiendamia.com/pe/e-product?ebay=v1%7C175058436059%7C0&pName=85W-Quiet-Oilless-Vacuum-Pump> (accessed Apr. 13, 2022).
- [42] Geek Factory, “FS300A caudalímetro sensor de flujo 3/4 pulgada,” *Geek Factory*, 2022. <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/fs300a-caudalimetro-sensor-de-flujo-3-4-pulgada/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [43] BELL Flow Systems, “MEMS Mass Flow Meters MF5700 Series,” *Siargo Ltd.*, 2022. https://www.bellflowsystems.co.uk/files/attachments/1477/MF5700_Datasheet.pdf (accessed Apr. 13, 2022).
- [44] Vandagraph Ltd., “VN202 MkII analizador de oxígeno,” *Marine Vision S.L.*, 2022. http://www.marinevision.es/es/diving-pro/vandagraph/an_vn202.html (accessed Apr. 13, 2022).
- [45] Seeed Studio, “Grove - Gas Sensor(O₂),” *Seed Studio*, 2022. https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Gas_Sensor-O2/ (accessed Apr. 13, 2022).
- [46] Robots-argentina, “Arduino: Motor paso a paso 28BYJ-48 y módulo ULN2003,” *Robots-argentina.com*, 2020.
- [47] Easttrans, “3/16" I.D. x 1/4" O.D. Tubo de vinilo transparente 50 pies., manguera de tubo de PVC híbrido flexible, tubo de plástico ligero resistente a los productos químicos, sin BPA y no tóxico,” *amazon*, 2022. <https://www.amazon.com/-/es/transparente-manguera-flexible-resistente-productos/dp/B08V16VP4Z?th=1> (accessed Apr. 13, 2022).

- [48] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, “NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 343:2004,” *INEN*, 2004. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2343.pdf> (accessed Apr. 28, 2022).
- [49] Inogen, “Inogen One G4 - Columna de repuesto para concentrador de oxígeno portátil G4 de alta flujo (ajuste de flujo 1-3),” *Amazon.com*, 2022.
- [50] Extrusax, “CÁTALOGO DE PERFILES DE ALUMINIO NORMALIZADOS,” *Extrusax aluminium extrusion products*, 2022. [https://www.extrusax.com/imagenes/descargas/es/12/STANDARD_PROFILES - PERFILES NORMALIZADOS.pdf](https://www.extrusax.com/imagenes/descargas/es/12/STANDARD_PROFILES_-_PERFILES_NORMALIZADOS.pdf) (accessed Apr. 29, 2022).
- [51] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code*, Latest Edi. New York: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER, 2021.
- [52] J. Gere and B. Goodno, *Mecánica de materiales*, Séptima Ed. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2009.
- [53] F. D. Del Castillo, “RECIPIENTES A PRESIÓN,” *Universidad Nacional Autónoma de Mexico*, Cuatitlán Izcalli, 2018.

5 ANEXOS

5.1 ANEXO A (Tabla de esfuerzo máximo permisible en tensión)

Table 1B (Cont'd)
Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values, S, for Nonferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Condition/ Temper
1	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91060	H112
2	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91060	H112
3	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91060	H12
4	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91060	H14
5	...	Drawn smls. tube	SB-210	...	A91060	O
6	...	Drawn smls. tube	SB-210	...	A91060	H14
7	...	Drawn smls. tube	SB-210	...	A91060	H113
8	...	Bar, rod, shapes	SB-221	...	A91060	O
9	...	Bar, rod, shapes	SB-221	...	A91060	H112
10	...	Cond. & heat exch. tubes	SB-234	...	A91060	H14
11	...	Smls. extr. tube	SB-241	...	A91060	O
12	...	Smls. extr. tube	SB-241	...	A91060	H112
13	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	O
14	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	H112
15	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	H112
16	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	H112
17	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	H12
18	...	Plate, sheet	SB-209	...	A91100	H14
19	...	Bar, rod, shapes	SB-221	...	A91100	O
20	...	Bar, rod, shapes	SB-221	...	A91100	H112
21	...	Smls. extr. tube	SB-241	...	A91100	O
22	...	Smls. extr. tube	SB-241	...	A91100	H112
23	...	Die forgings	SB-247	...	A92014	T4
24	...	Die forgings	SB-247	...	A92014	T6
25	...	Die forgings	SB-247	...	A92014	T6

Table 1B (Cont'd)
Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values, S, for Nonferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding																	
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950
1	2.9	2.7	2.4	2.2	1.7	1.4	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	2.6	2.4	2.2	1.9	1.5	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3	3.1	3.1	2.9	2.7	2.1	1.8	1.1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	3.4	3.4	3.4	3.4	2.6	1.8	1.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	3.4	3.4	3.4	3.4	2.6	1.8	1.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
9	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	3.4	3.4	3.4	3.4	2.6	1.8	1.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	2.3	2.3	2.3	2.3	1.8	1.4	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	3.7	3.7	3.5	3.1	2.4	1.7	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	3.3	3.3	3.2	2.9	2.2	1.7	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16	2.7	2.7	2.6	2.5	1.8	1.4	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	4.0	4.0	4.0	3.6	2.8	2.0	1.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	4.6	4.6	4.6	4.2	2.8	2.0	1.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	2.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.4	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	2.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.4	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

5.2 ANEXO 2 (Programación ARDUINOS UNO)

```
1 // solenoides
2 #define LV1 6
3 #define LA 7
4 #define RELE1 3
5 #define RELE2 4
6 #define RELE3 8
7 #define RELE4 9
8 #define RELE5 10
9 #define RELE6 11
10 #define RELE7 12
11 #define RELE8 13
12 #define P1 5
13 byte Push_leer=0;
14 byte estado_led=0;
15 byte estado_anterior=0;
16 //// sensor de flujo
17 volatile int Contador; //variable que cuenta los pulsos
18 int PinSensor = 2; // pin donde se conecta el sensor
19 //////////// función a ejecutarse en cada interrupción
20 void setup() {
21 //RELE
22 pinMode(LV1,OUTPUT);
23 pinMode(RELE1,OUTPUT);
24 pinMode(RELE2,OUTPUT);
25 pinMode(RELE3,OUTPUT); //valvula1
26 pinMode(RELE4,OUTPUT); //valvula2
27 pinMode(RELE5,OUTPUT); //valvula3
28 pinMode(RELE6,OUTPUT); //valvula4
29 pinMode(RELE7,OUTPUT); //valvula5
30 pinMode(RELE8,OUTPUT); //valvula6
31 pinMode(LA,OUTPUT);
32 pinMode(P1,INPUT);
33
34 //sensor de flujo
35 Serial.begin(9600);
36 pinMode(PinSensor, INPUT);
37 }
38 void loop() {
39 digitalWrite(LA,HIGH);
40 Push_leer=digitalRead(P1);
41 //valuvulas apagadas ciclo=0
42 digitalWrite(8,LOW);
43 digitalWrite(9,LOW);
44 digitalWrite(10,LOW);
45 digitalWrite(11,LOW);
46 digitalWrite(12,HIGH);
```

```

47  digitalWrite(13,LOW);
48  if(Push_leer==1){
49    Serial.println("Encendido del Banco de Pruebas");
50    // Puesto en marcha el sistema
51    digitalWrite(LV1,HIGH); //luz verde
52    digitalWrite(LA,LOW); //luz amarilla
53    digitalWrite(3,HIGH); // rele 1 compresor
54    digitalWrite(4,HIGH); // rele 2 ventilador
55    delay(1000);
56    // Inicia la secuencia ciclo1
57    digitalWrite(8,HIGH); // abierto V1
58    digitalWrite(9,LOW); // CERRADO V2
59    digitalWrite(10,HIGH); // ABIERTO PURG_2
60    digitalWrite(11,LOW); //CERRADA PURG_1
61    digitalWrite(12,HIGH); //CERRADA COLM_2
62    digitalWrite(13,HIGH); // ABIERTO COLM_1
63    Serial.println("Inicio Etapa 1 y 2 ");
64    Serial.println(" ***ETAPA 1*** ");
65    Serial.println(" V1---Abierto");
66    Serial.println(" V2---Cerrado");
67    Serial.println(" V3---Abierto");
68    Serial.println(" V4---Cerrado");
69    Serial.println(" V5---Cerrado");
70    Serial.println(" V6---Cerrado");
71    Serial.println(" ***ETAPA 2*** ");
72    Serial.println(" V1---Abierto");
73    Serial.println(" V2---Cerrado");
74    Serial.println(" V3---Abierto");
75    Serial.println(" V4---Cerrado");
76    Serial.println(" V5---Cerrado");
77    Serial.println(" V6---Abierto");
78    delay(300000); // tiempo de regulacion 5 min
79    //ciclo2
80    digitalWrite(8,LOW); // CERRADO V1
81    digitalWrite(9,HIGH); // ABIERTO V2
82    digitalWrite(10,LOW); // CERRADA PURG_2
83    digitalWrite(11,HIGH); // ABIERTO PURG_1
84    digitalWrite(12,LOW); // ABIERTO COLM_2
85    digitalWrite(13,LOW); // CERRADO COLM_1
86    Serial.println("Inicio Etapa 3 y 4 ");
87    Serial.println(" ***ETAPA 3*** ");
88    Serial.println(" V1---Cerrado");
89    Serial.println(" V2---Abierto");
90    Serial.println(" V3---Cerrado");
91    Serial.println(" V4---Abierto");
92    Serial.println(" V5---Cerrado");
93    Serial.println(" V6---Cerrado");
94    Serial.println(" ***ETAPA 4*** ");

```

```

95 Serial.println(" V1---Cerrado");
96 Serial.println(" V2---Abierto");
97 Serial.println(" V3---Cerrado");
98 Serial.println(" V4---Abierto");
99 Serial.println(" V5---Abierto");
100 Serial.println(" V6---Cerrado");
101 delay(300000); // tiempo de regulacion 5 min
102 //apagado rele
103 digitalWrite(3,LOW);
104 digitalWrite(4,LOW);
105 delay(1000);
106 Serial.println(" Fin de ciclo Skarstrom del Banco de
107 Pruebas");
108 }
    }

```

```

1 #include <Stepper.h>
2 #include <Wire.h>;
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>;
4
5
6 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,4); //16,4 es el tamaño de la
7 pantalla
8
9 Stepper motor1(2048, 4,6,5,7); //pasos completos
10 int derecha=2;
11 int izquierda=3;
12 int estado1;
13 int estado2;
14 int a=0;
15 int b=0;
16 int c=5;
17
18 void setup(){
19
20 pinMode (derecha,INPUT);
21 pinMode (izquierda, INPUT);
22 digitalWrite (derecha, LOW);
23 digitalWrite (izquierda, LOW);
24 motor1.setSpeed(3); // en rpm 1 2 3
25 Serial.begin(9600);
26 // LCD
27 lcd.backlight(); //inicio de fondo retroalimentado
28 lcd.init(); //inicializacion de la pantalla

```

```

29 lcd.clear();//limpieza de la pantalla
30
31 delay(1000);
32 lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
33 lcd.print("UNIVERSIDAD"); //escritura en la primera linea
34 delay(1400);
35 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
36 lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
37 lcd.print("TECNICA "); //escritura en la primera linea
38 delay(1400);
39 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
40 lcd.setCursor(7,0);//posicionamiento en la primera linea
41 lcd.print("DE"); //escritura en la primera linea
42 delay(1400);
43 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
44 lcd.setCursor(5,0);//posicionamiento en la primera linea
45 lcd.print("AMBATO"); //escritura en la primera linea
46 delay(1400);
47 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
48 lcd.setCursor(2,0);//posicionamiento en la primera linea
49 lcd.print("CONCENTRADOR"); //escritura en la primera linea
50 lcd.setCursor(4,1);//posicionamiento en la primera linea
51 lcd.print("OXIGENO"); //escritura en la primera linea
52 delay(1400);
53
54 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
55 lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
56 lcd.print("ALUMNO:"); //escritura en la primera linea
57 lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
58 lcd.print("Paul Barragan"); //escritura en la primera linea
59 delay(1400);
60
61 }
62 void loop () {
63 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
64 estado1 = digitalRead(derecha);
65 estado2 = digitalRead(izquierda);
66
67 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
68 lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
69 lcd.print("MODULO C.O."); //escritura en la primera linea
70 lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
71 lcd.print("LISTO"); //escritura en la primera linea
72 //lcd.print(a); //escritura en la primera linea
73
74
75 delay(1400);
76 if (estado1==HIGH) {

```

```

77     //cerrar
78     lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
79     lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
80     lcd.print("Activado..."); //escritura en la primera linea
81     motor1.step(-370); //cantidad de paso
82     Serial.print("p1 cerrar");
83     a=a-1;
84     Serial.println(a);
85     if (a==1){
86         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
87         lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
88         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
89         lcd.setCursor(3,0); //posicionamiento en la primera linea
90         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
91         lcd.setCursor(4,0); //posicionamiento en la primera linea
92         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
93         lcd.setCursor(8,0); //posicionamiento en la primera linea
94         lcd.print("CO:93.5%"); //escritura en la primera linea
95         c=c+5;
96         lcd.setCursor(0,1); //posicionamiento en la primera linea
97         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
98         lcd.setCursor(3,1); //posicionamiento en la primera linea
99         lcd.print(c); //escritura en la primera linea
100        lcd.setCursor(6,1); //posicionamiento en la primera linea
101        lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
102
103        delay(9000); //tiempo de visualizacion
104    }
105    if (a==2){
106        lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
107        lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
108        lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
109        lcd.setCursor(3,0); //posicionamiento en la primera linea
110        lcd.print(a); //escritura en la primera linea
111        lcd.setCursor(4,0); //posicionamiento en la primera linea
112        lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
113        lcd.setCursor(8,0); //posicionamiento en la primera linea
114        lcd.print("CO:90.8%"); //escritura en la primera linea
115        c=c+5;
116        lcd.setCursor(0,1); //posicionamiento en la primera linea
117        lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
118        lcd.setCursor(3,1); //posicionamiento en la primera linea
119        lcd.print(c); //escritura en la primera linea
120        lcd.setCursor(6,1); //posicionamiento en la primera linea
121        lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
122
123        delay(9000);
124    }

```

```

125
126     if (a==3){
127         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
128         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
129         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
130         lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
131         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
132         lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
133         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
134         lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
135         lcd.print("CO:87.8%"); //escritura en la primera linea
136         c=c+5;
137         lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
138         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
139         lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
140         lcd.print(c); //escritura en la primera linea
141         lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
142         lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
143         delay(9000);
144     }
145
146     if (a==4){
147         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
148         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
149         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
150         lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
151         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
152         lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
153         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
154         lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
155         lcd.print("CO:85.34%"); //escritura en la primera linea
156         c=c+5;
157         lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
158         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
159         lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
160         lcd.print(c); //escritura en la primera linea
161         lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
162         lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
163         delay(9000);
164     }
165
166     if (a==5){
167         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
168         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
169         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
170         lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
171         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
172         lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea

```



```

173     lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
174     lcd.setCursor(8,0); //posicionamiento en la primera linea
175     lcd.print("CO:83.3%"); //escritura en la primera linea
176     c=c+5;
177     lcd.setCursor(0,1); //posicionamiento en la primera linea
178     lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
179     lcd.setCursor(3,1); //posicionamiento en la primera linea
180     lcd.print(c); //escritura en la primera linea
181     lcd.setCursor(6,1); //posicionamiento en la primera linea
182     lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
183     delay(9000);
184     }
185
186     if(a<=0){
187         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
188         Serial.println("Fuera de rango bajo");
189         lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
190         lcd.print("Atencion"); //escritura en la primera linea
191         lcd.setCursor(0,1); //posicionamiento en la primera linea
192         lcd.print("Rango min."); //escritura en la primera linea
193         delay(1400);
194
195     }
196 }
197 if (estado2==HIGH){
198     lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
199     lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
200     lcd.print("Activado..."); //escritura en la primera linea
201     motor1.step(370);
202     Serial.print("p2 abrir");
203     a=a+1;
204     Serial.print(a);
205     if (a==1){
206         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
207         lcd.setCursor(0,0); //posicionamiento en la primera linea
208         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
209         lcd.setCursor(3,0); //posicionamiento en la primera linea
210         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
211         lcd.setCursor(4,0); //posicionamiento en la primera linea
212         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
213         lcd.setCursor(8,0); //posicionamiento en la primera linea
214         lcd.print("CO:93.5%"); //escritura en la primera linea
215         ///////////////////////////////////////////////////
216         c=c+5;
217         lcd.setCursor(0,1); //posicionamiento en la primera linea
218         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
219         lcd.setCursor(3,1); //posicionamiento en la primera linea
220         lcd.print(c); //escritura en la primera linea

```

```

221     lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
222     lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
223     delay(9000);
224     }
225     if (a==2){
226         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
227         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
228         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
229         lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
230         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
231         lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
232         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
233         lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
234         lcd.print("CO:90.8%"); //escritura en la primera linea
235         ///////////////////////////////////
236         c=c+5;
237         lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
238         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
239         lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
240         lcd.print(c); //escritura en la primera linea
241         lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
242         lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
243         delay(9000);
244         }
245
246         if (a==3){
247             lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
248             lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
249             lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
250             lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
251             lcd.print(a); //escritura en la primera linea
252             lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
253             lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
254             lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
255             lcd.print("CO:87.8%"); //escritura en la primera linea
256             ///////////////////////////////////
257             c=c+5;
258             lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
259             lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
260             lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
261             lcd.print(c); //escritura en la primera linea
262             lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
263             lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
264             delay(9000);
265             }
266
267             if (a==4){
268                 lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir

```

```

269     lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
270     lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
271     lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
272     lcd.print(a); //escritura en la primera linea
273     lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
274     lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
275     lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
276     lcd.print("CO:85.34%"); //escritura en la primera linea
277     //////////////////////////////////////
278     c=c+5;
279     lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
280     lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
281     lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
282     lcd.print(c); //escritura en la primera linea
283     lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
284     lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
285     delay(9000);
286     }
287
288     if (a==5){
289         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
290         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
291         lcd.print("F:"); //escritura en la primera linea
292         lcd.setCursor(3,0);//posicionamiento en la primera linea
293         lcd.print(a); //escritura en la primera linea
294         lcd.setCursor(4,0);//posicionamiento en la primera linea
295         lcd.print("Lts"); //escritura en la primera
296         lcd.setCursor(8,0);//posicionamiento en la primera linea
297         lcd.print("CO:83.3%"); //escritura en la primera linea
298         //////////////////////////////////////
299         c=c+5;
300         lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
301         lcd.print("T:"); //escritura en la primera linea
302         lcd.setCursor(3,1);//posicionamiento en la primera linea
303         lcd.print(c); //escritura en la primera linea
304         lcd.setCursor(6,1);//posicionamiento en la primera linea
305         lcd.print("seg"); //escritura en la primera linea
306         delay(9000);
307         }
308
309     if(a>5){
310         Serial.println("Fuera de rango alto");
311         lcd.clear(); //limpiar la lcd antes de escribir
312         lcd.setCursor(0,0);//posicionamiento en la primera linea
313         lcd.print("Atencion"); //escritura en la primera linea
314         lcd.setCursor(0,1);//posicionamiento en la primera linea
315         lcd.print("Rango max."); //escritura en la primera linea
316         delay(1400);

```

```
317      }  
318      }  
319      }  
      }
```

5.3 ANEXO C (Construcción)

Pesar zeolita para cada columna.



Llenar zeolita en colmnas.



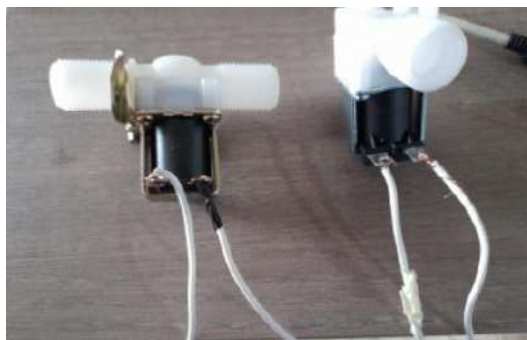
Armar columnas



Armado del concentrador de oxígeno



Conexión eléctrica de las válvulas solenoides



Conexiones eléctricas



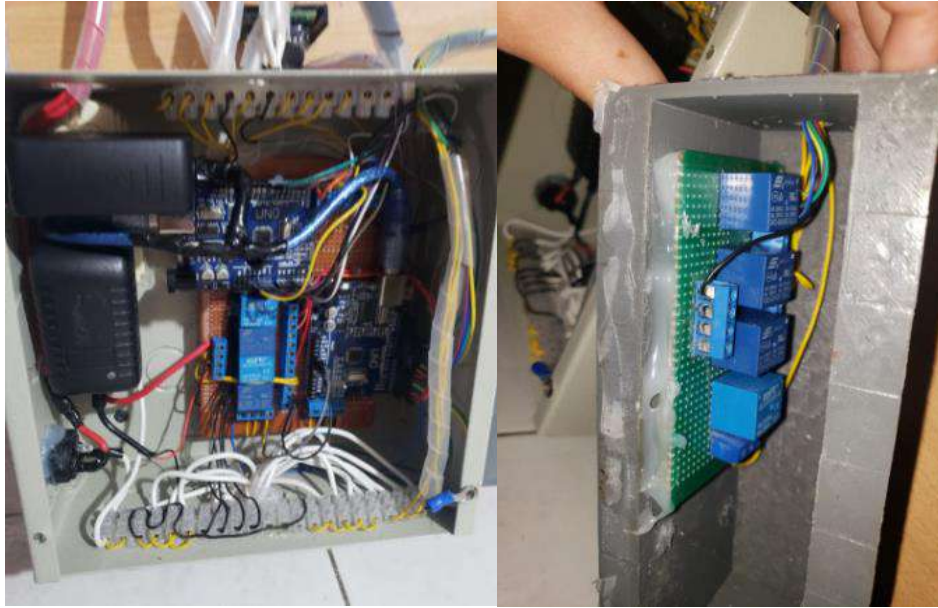
Comprobación de voltajes en las solenoides



Acople para el analizador de oxígeno



Circuitos de control



Pruebas de funcionamiento








Concentrador de oxígeno terminado








5.4 ANEXO D (toma de valores de concentración de oxígeno a distintos flujos)






1LPM

<p>Toma 1</p>	
<p>Toma 2</p>	
<p>Toma 3</p>	
<p>Toma 4</p>	
<p>Toma 5</p>	






2LPM

<p>Toma 1</p>	
<p>Toma 2</p>	
<p>Toma 3</p>	
<p>Toma 4</p>	
<p>Toma 5</p>	






3 LPM

<p>Toma 1</p>	
<p>Toma 2</p>	
<p>Toma 3</p>	
<p>Toma 4</p>	
<p>Toma 5</p>	

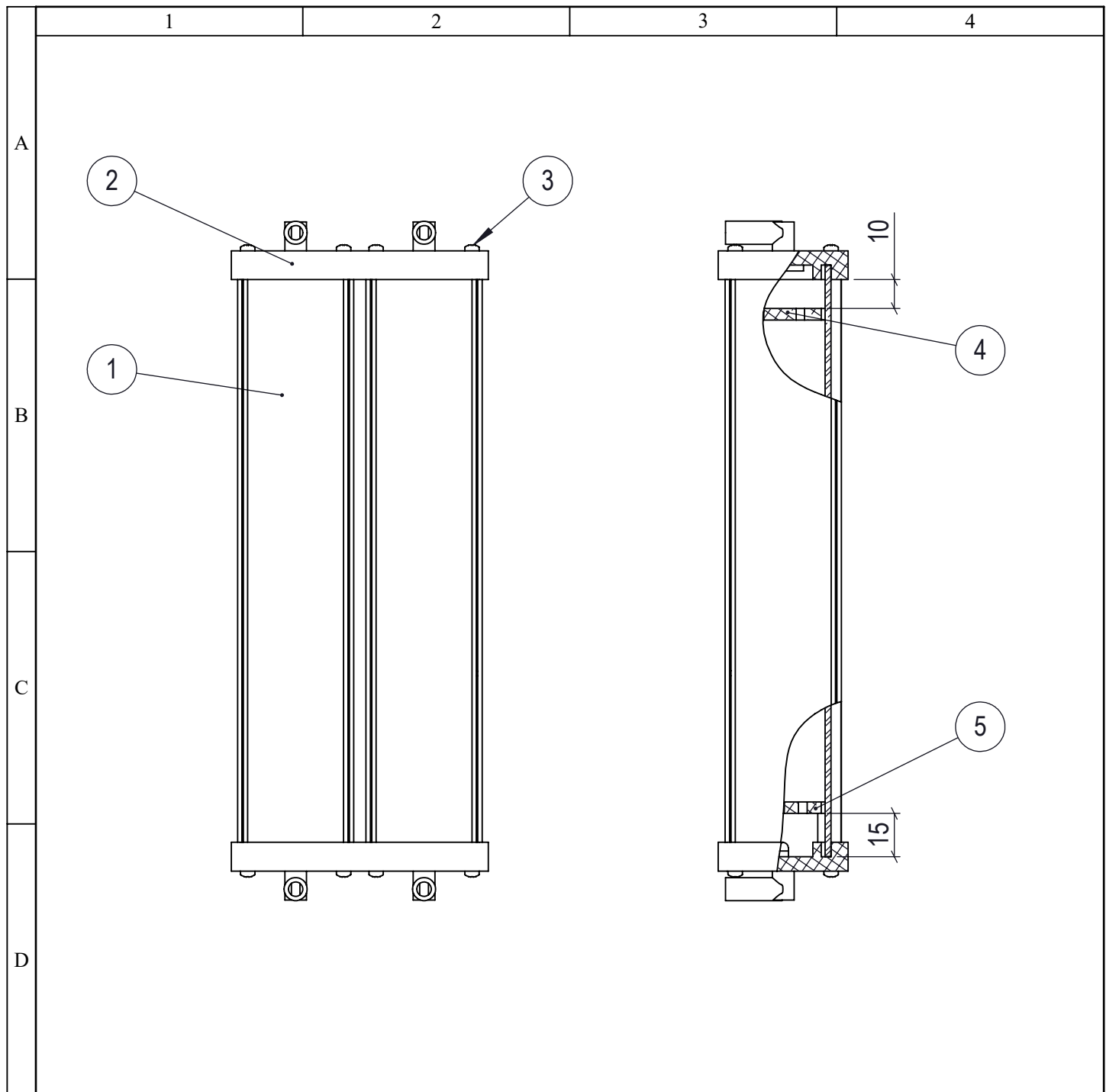
4 LPM

<p>Toma 1</p>	 A handheld yellow and black oxygen analyzer is held in a hand. The LCD screen displays '86.6' and '% O2'. The device has a 'CALIBRATION' button and a 'ZERO' button. A yellow coiled cable is connected to the top.
<p>Toma 2</p>	 The handheld oxygen analyzer is shown in a laboratory setting. The screen displays '85.4' and '% O2'. It is connected to a grey base unit with a green cap and a yellow coiled cable.
<p>Toma 3</p>	 A similar view to Toma 2, showing the handheld oxygen analyzer with the screen displaying '85.4' and '% O2'. The device is connected to the same laboratory setup.
<p>Toma 4</p>	 Another view of the handheld oxygen analyzer in the lab, with the screen showing '85.4' and '% O2'. The setup is consistent with the previous measurements.
<p>Toma 5</p>	 The final measurement, showing the handheld oxygen analyzer with the screen displaying '85.4' and '% O2'. The device is connected to the laboratory equipment.

5 LPM

<p>Toma 1</p>	
<p>Toma 2</p>	
<p>Toma 3</p>	
<p>Toma 4</p>	
<p>Toma 5</p>	

5.5 ANEXO E (Planos)

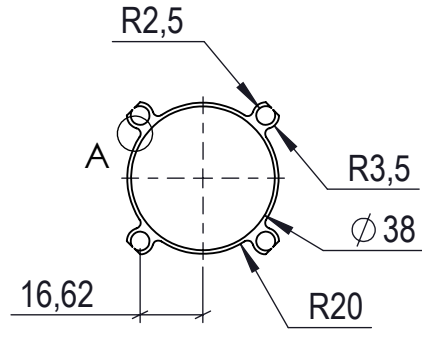


E	5	Filtro 2	-	2	ABS	6.83	-
	4	Filtro 1	-	2	ABS	3.60	-
	3	M 2.5 x 0.45 x 16	ISO 7045	16	SAE 1010	0.10	-
	2	Tapa	-	2	ABS	30.11	-
	1	Columna	-	2	Aleación 1060	109.75	-
	No. de elemento	Denominación	No. de norma/dibujo	Cantidad	Material	Peso (Gr)	Observaciones

				Tolerancia	(Peso)	Materiales: Varios	
				±0.1	302.16 Gr		
				Fecha	Nombre	Denominación: Columnas de adsorción	Escala: 1:2
				Dibujó: 30/05/2022	Paul Barragán		
				Revisó: 30/05/2022	Ing. Jorge López		
				Aprobó: 30/05/2022	Ing. Jorge López		
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 01 de 05	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

N 8

A

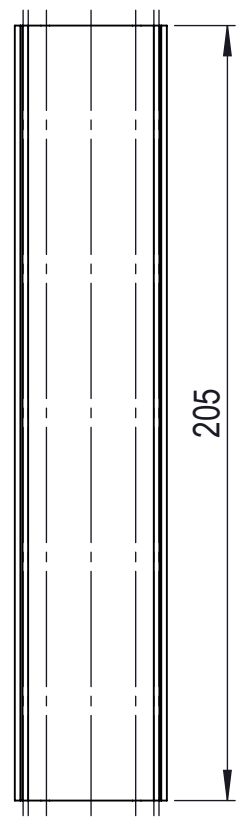


B

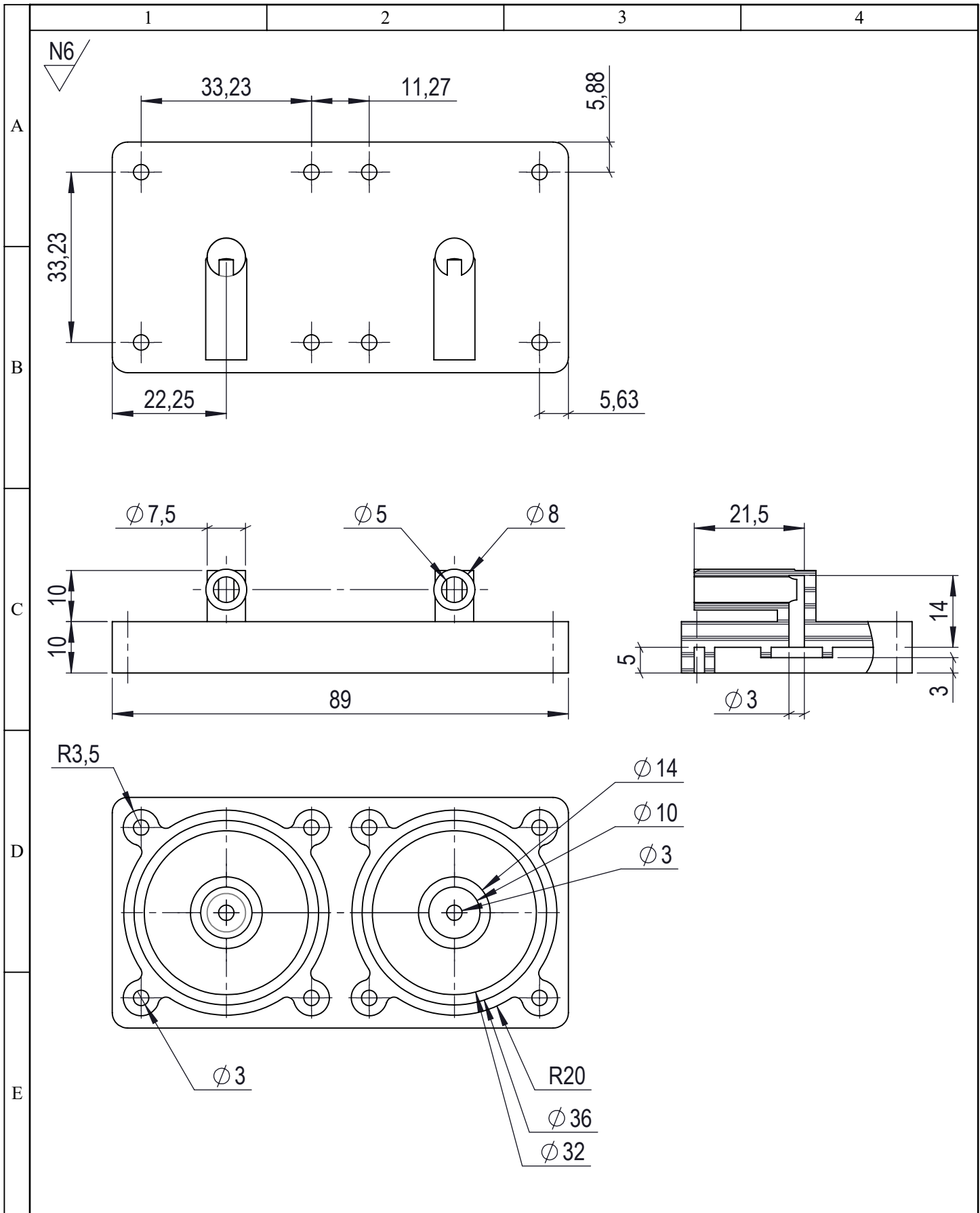
C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:			
				± 0.1	109.75 Gr	Aleación 1060			
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:		
				Dibujó: 30/05/2022	Paul Barragán			Columna de adsorción	1:2
				Revisó: 30/05/2022	Ing. Jorge Lopez				
				Aprobó: 30/05/2022	Ing. Jorge Lopez	Número del dibujo: 02 de 05			
				UTA Ingeniería Mecánica		(Sustitución)			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.1	30.11 Gr	ABS	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	30/05/2022	Paul Barragán		
			Revisó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez		
				Aprobó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez	1:1
				UTA		Número del dibujo:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Ingeniería Mecánica		03 de 05	
						(Sustitución)	

N6

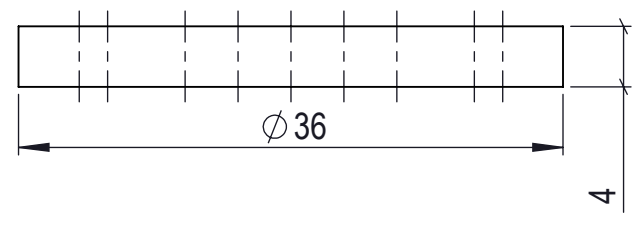
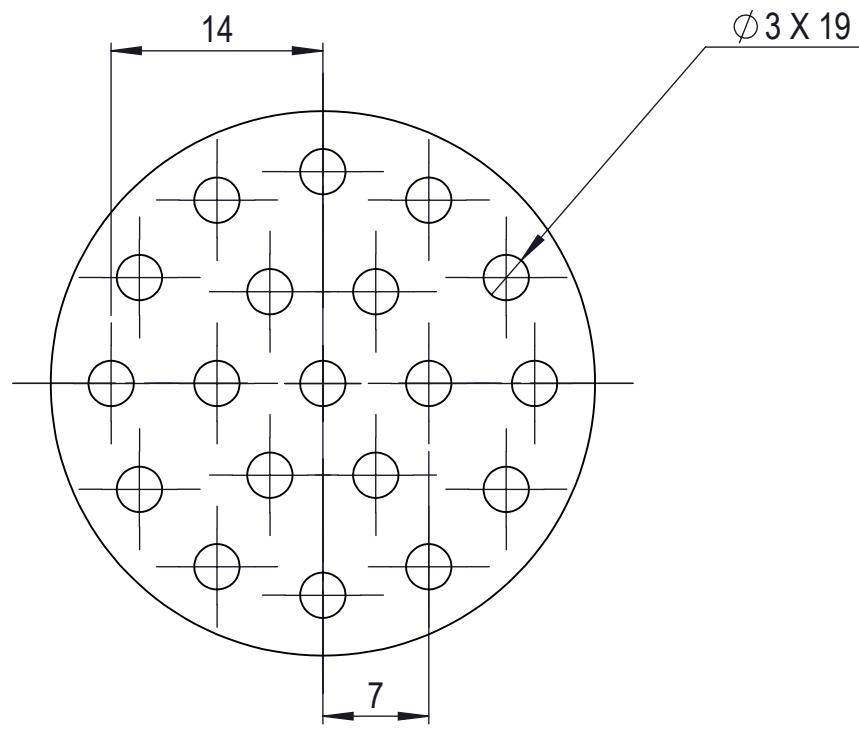
A

B

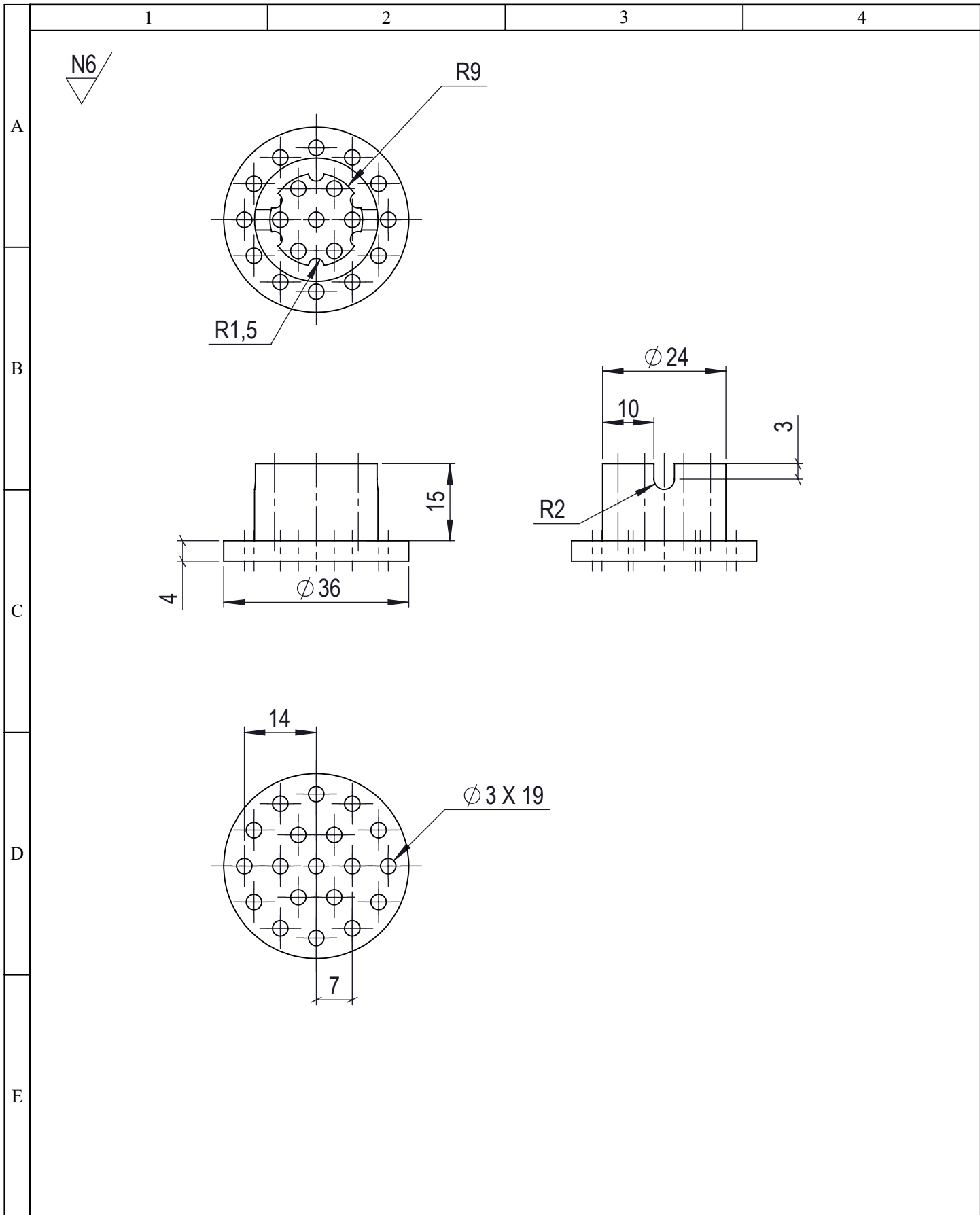
C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.1	3.60 Gr	ABS	
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	30/05/2022	Paul Barragán	
				Revisó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez	
				Aprobó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez	Escala: 2:1
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 04 de 05	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:			
				±0.1	6.83 Gr	ABS			
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:		
			Dibujó:	30/05/2022	Paul Barragán			Filtro 2	1:1
			Revisó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez				
				Aprobó:	30/05/2022	Ing. Jorge Lopez			
				UTA		Número del dibujo:	05 de 05		
				Ingeniería Mecánica		(Sustitución)			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						