

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



**PROYECTO DE GRADO**

**DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE OXÍGENO PORTÁTIL DE  
OXIGENOTERAPIA PARA EL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
MECÁNICAS Y ELECTROMECAÁNICAS IIME**

**POSTULANTE: MARVIN MALDONADO MORALES**

**ASESOR: ING. JUAN CARLOS DUCHEN CUELLAR**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTROMECAÁNICO**

**LA PAZ - BOLIVIA**

**2023**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a dios por haberme otorgado un padre maravilloso quien me brindo su apoyo incondicional para lograr cumplir con mis objetivos académicos y personales dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio. Con mucho cariño me impulsaste a perseguir mis metas y a no abandonarlas pese a las adversidades, muchas gracias por forjar mi carácter en base a principios y valores.

Muchas gracias papá

En segunda instancia agradezco a mis docentes personas de gran sabiduría quienes dieron todo el esfuerzo en la enseñanza departida la cual me ayudo a llegar al punto en el cual me encuentro.

Muchas gracias a mis docentes

## **DEDICATORIA**

De manera muy especial a mi padre Filemón Maldonado Flores que en vida fue un hombre ejemplar apasionado de su profesión del cual me siento muy orgulloso, te quiero y no hay forma de poder devolverte todo lo que me ofreciste en el transcurso de mi formación.

Al señor por estar conmigo a cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente para poder alcanzar las metas que me propongo.

## **PENSAMIENTO**

Soy campeón, siempre gano nunca pierdo rara vez empato por eso soy campeón.

Filemón Maldonado Flores

No hay que tenerle miedo a la competencia hay que tenerle pánico a nuestra propia incompetencia.

Juan Antonio Gimeno

El éxito en la vida es directamente proporcional a la capacidad para tomar las mejores decisiones en los momentos precisos.

Carlos Cuauhtémoc Sánchez

## RESUMEN

El presente proyecto de grado muestra el hincapié en la solución a los problemas respiratorios presentados estos últimos años a causa del COVID – 19, usándose este dispositivo en la rehabilitación mediante el uso de oxígeno medicinal en pacientes con problemas respiratorios (lesiones pulmonares) bajo la norma de IBNORCA de calidad de oxígeno medicinal 73001 (elevada concentración de pureza de oxígeno), mediante el proceso de Adsorción por Oscilación de Presión PSA con etapas adsorción o producción, regeneración o desorción y purga, usando como adsorbente la zeolita X13 HP que se encarga de separar los componentes de un flujo (oxígeno, nitrógeno, otros gases del aire), a una presión diferente por encima de la presión atmosférica, se utilizaron paquetes computacionales como el SolidWorks en el diseño mecánico, Festo Fluidsim para el diseño neumático, Proteus para el diseño electrónico, AutoCAD electrical para el diseño eléctrico, Arduino Uno para la parte de control.

## ABSTRACT

This degree project shows the emphasis on the solution to the respiratory problems presented in recent years due to COVID - 19, using this device in the rehabilitation through the use of medicinal oxygen in patients with respiratory problems (lung injuries) under the IBNORCA standard of quality of medicinal oxygen 73001 (high concentration of oxygen purity), through the PSA Pressure Swing Adsorption process with adsorption or production, regeneration or desorption and purge stages, using as adsorber Before the X13 HP zeolite, which is responsible for separating the components of a flow (oxygen, nitrogen, other air gases), at a different pressure above atmospheric pressure, computer packages such as SolidWorks were used for mechanical design, Festo Fluidsim for pneumatic design, Proteus for electronic design, AutoCAD electrical for electrical design, Arduino Uno for the control part.

## Índice general

1	Planteamiento del problema .....	1
1.1	Formulación del problema .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	Justificación.....	3
1.3.1	Justificación económica .....	4
1.3.2	Justificación social .....	4
1.3.3	Justificación tecnológica.....	4
1.4	Características de solución.....	5
1.4.1	Oxígeno por la electrolisis del agua.....	5
1.4.2	Oxígeno por la destilación de aire licuado .....	6
1.4.3	Oxígeno por el principio de separación de gases por adsorción .....	6
1.5	Propósitos de la solución .....	8
1.6	Delimitación o límite .....	9
1.7	Limitaciones de la solución propuesta .....	9
2	Fundamento teórico .....	10
2.1	Antecedentes .....	10
2.1.1	Antecedentes Institucionales .....	10
2.2	Bases teóricas.....	11
2.2.1	Sistema Respiratorio.....	11
2.2.2	Oxigenoterapia .....	16
2.2.3	Concentrador de oxígeno portátil .....	18
2.2.4	Fundamento de la adsorción .....	22
2.2.5	Adsorción por Oscilación de Presión (PSA) .....	24

2.3	Metodología, herramientas y ambiente de desarrollo.....	26
3	Ingeniería del proyecto.....	28
3.1	Parámetros de diseño .....	28
3.1.1	Dimensiones principales del concentrador de oxígeno portátil .....	28
3.2	Sistemas y subsistemas .....	30
3.2.1	Sistema mecánico .....	31
3.2.2	Sistema eléctrico y neumático .....	63
3.2.3	Sistema de control.....	66
3.3	Análisis previo al diseño .....	68
3.4	Diseño de elementos .....	69
3.5	Especificación de componentes .....	71
3.6	Resumen de memoria de cálculo .....	72
3.7	Balance de materiales .....	73
3.8	Planos de conjunto y despiece.....	74
4	Simulación del proceso .....	75
4.1	Simulador Proteus .....	75
4.2	Procedimiento del diseño general .....	75
4.3	Simulación del Arduino Uno.....	77
5	Costos .....	82
5.1	Costo de los materiales.....	82
5.2	Costos varios.....	83
5.3	Costos de mano de obra .....	83
5.4	Resumen de costos (Costo neto).....	84
5.5	Precio final .....	84
6	Evaluación .....	87
6.1	Evaluación técnica .....	87



6.2	Evaluación económica .....	87
6.3	Recomendaciones .....	88
6.4	Conclusiones .....	88
6.5	Referencias .....	89
7	Anexos.....	90
Figura 1.	Esquema de la electrólisis del agua .....	5
Figura 2.	Esquema de la destilación de aire licuado .....	6
Figura 3.	Esquema del principio de separación de gases por adsorción .....	7
Figura 4.	Flujo de salida para procesos de adsorción .....	8
Figura 5.	Esquema de la Inspiración y Espiración .....	16
Figura 6.	Esquema de flujos de oxígeno.....	17
Figura 7.	Electroválvula 5/2 .....	19
Figura 8.	Acumulador de aire.....	19
Figura 9.	Humidificador de oxígeno.....	20
Figura 10.	Distribución del tamaño de microporos zeolita tipo 3A (a), 4A (b), 5A (c), 10X (d), 13X (e) tamiz molecular del carbono (f) el carbono activado (g).....	21
Figura 11.	Zeolita 13X HP Molecular Sieve.....	22
Figura 12.	Mecanismo de adsorción estérico .....	23
Figura 13.	Esquema estándar del proceso PSA.....	24
Figura 14.	Esquema de operación de los procesos PSA, TSA y PTAS .....	25
Figura 15.	Diseño de la caja .....	29
Figura 16.	Sistemas y subsistemas.....	30
Figura 17.	Diseño de la celda de zeolita .....	59
Figura 18.	Diseño de la tapa de zeolita .....	59

Figura 19.	Vista de la celda de zeolita .....	60
Figura 20.	Modelo del diseño de la tapa y de la celda de zeolita en SolidWorks ...	63
Figura 21.	Esquema del sistema neumático .....	64
Figura 22.	Esquema de los ciclos del sistema neumático .....	65
Figura 23.	Esquema del sistema eléctrico .....	66
Figura 24.	Esquema de un sistema de control .....	66
Figura 25.	Diseño del concentrador portátil de oxígeno .....	71
Figura 26.	Diseño realizado en Proteus.....	76
Figura 27.	Diseño realizado en Proteus.....	76
Figura 28.	Arduino Uno .....	77
Tabla 1.	Cuadro de comparación del costo en bolivianos de los botellones de oxígeno .....	1
Tabla 2.	Cuadro de comparación del costo de oxígeno en bolivianos .....	2
Tabla 3.	Características del concentrador.....	18
Tabla 4.	Características del compresor .....	21
Tabla 5.	Dimensiones generales.....	29
Tabla 6.	Especificaciones de la zeolita .....	31
Tabla 7.	Altura de la celda según diámetro de un cilindro .....	58
Tabla 8.	Fórmulas de la presión interna máxima.....	60
Tabla 9.	Propiedades para cada celda y tapa de zeolita .....	61
Tabla 10.	Características técnicas del Arduino Uno .....	67
Tabla 11.	Peso de las partes del concentrador de oxígeno medicinal.....	68
Tabla 12.	Detalle del tubo PVC clase 9 .....	70
Tabla 13.	Detalle de la tapa esquema 40 .....	70

Tabla 14.	Especificación de componentes.....	71
Tabla 15.	Detalle de la memoria de cálculo sistema mecánico.....	72
Tabla 16.	Detalle de la memoria de cálculo sistema neumático.....	73
Tabla 17.	Resumen de los componentes de los sistemas.....	73
Tabla 18.	Balance de materiales.....	74
Tabla 19.	Balance de materiales.....	74
Tabla 20.	Costo de los materiales.....	82
Tabla 21.	Costo de máquina.....	83
Tabla 22.	Costo de mano de obra.....	83
Tabla 23.	Resumen de costo.....	84
Tabla 24.	Precio final .....	84
Tabla 25.	Detalle del precio final.....	85
Anexo 1.	Plano de la celda de zeolita .....	90
Anexo 2.	Plano acumulador.....	91
Anexo 3.	Plano tapa de zeolita .....	92
Anexo 4.	Plano eléctrico.....	93
Anexo 5.	Plano eléctrico.....	94
Anexo 6.	Plano eléctrico.....	95
Anexo 7.	Plano eléctrico.....	96
Anexo 8.	Plano eléctrico.....	97
Anexo 9.	Plano carcasa .....	98

## CAPITULO I

### 1 Planteamiento del problema

#### 1.1 Formulación del problema

En nuestro territorio Boliviano estos últimos años la calidad de vida de los pacientes con problemas respiratorios y la infección causada por el COVID – 19 no mejoró en los gastos de salud sino que también disminuyó seriamente debido al uso generalizado de la oxigenoterapia a largo plazo, en nuestro departamento específicamente en la ciudad de La Paz existió gran demanda de oxígeno medicinal debido a que los pacientes con problemas respiratorios fue incrementando y una gran cantidad de estos pacientes no tenían acceso a recintos hospitalarios al mismo tiempo que varios recintos hospitalarios no contaban con los implementos de oxigenoterapia.

Debido a las lesiones pulmonares de los pacientes se vio la manera de rehabilitarlos mediante el uso de oxígeno medicinal, al mismo tiempo se tiene en cuenta los costos de implementación de un botellón y sus accesorios, llegando a costar en el mercado el botellón de 2 metros cúbicos 1800 Bs (Bolivianos), el botellón de 6 metros cúbicos llega a costar 2400 Bs (Bolivianos), el costo por recarga de oxígeno medicinal se realiza por metro cúbico llegando a costar 2 metros cúbicos a 60 Bs (Bolivianos), de 4 metros cúbicos 140 Bs (Bolivianos) y de 6 metros cúbicos a 170 Bs (Bolivianos) en OXIMEDIC (Centro de Oxígeno Medicinal).

Tabla 1. Cuadro de comparación del costo en bolivianos de los botellones de oxígeno

Botellón m <sup>3</sup>	Precio (Bs)
2	1800
6	2400

Fuente. Elaboración propia

Nota. Este cuadro compara el precio en bolivianos de botellones en el mercado

Tabla 2. Cuadro de comparación del costo de oxígeno en bolivianos

Oxígeno m <sup>3</sup>	Precio (Bs)
2	60
4	140
6	170

Fuente. Elaboración propia

Nota. Este cuadro compara el precio en bolivianos del oxígeno en el mercado

El concentrador portátil de oxígeno medicinal es la respuesta de los pacientes con problemas respiratorios y a la escasez de oxígeno medicinal que sufrió nuestra ciudad ya que proporciona constantemente oxígeno medicinal al encontrarse conectado a una red eléctrica y su única desventaja es el elevado costo situación por la cual gran parte de la población no puede acceder a tales dispositivos.

Detallando un poco el costo de un concentrador portátil de oxígeno Oxigen Concentrator de Potencia Industrial de 10 litros /minuto tiene un precio de 9150 + IVA dando un costo final de 10300 Bs (bolivianos) de doble función concentrador de oxígeno y nebulizador más su medidor de pureza.

De tal manera surge la cuestionante ¿Será posible diseñar un concentrador portátil de oxígeno medicinal para ser usado en oxigenoterapia en pacientes con problemas respiratorios y pacientes COVID colaborando de esta manera con la situación económica en la ciudad de La Paz?

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Diseñar un concentrador portátil de oxígeno medicinal de bajo costo para ser usado en oxigenoterapia en pacientes con problemas respiratorios bajo la norma de IBNORCA de la calidad del oxígeno medicinal 73001.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar los parámetros de diseño del concentrador de oxígeno medicinal.
- Realizar el diseño mecánico en base a especificaciones técnicas.
- Realizar el sistema de control del equipo usando Arduino Uno.
- Realizar el diseño del sistema electrónico en Proteus.
- Realizar el diseño neumático en Festo FluidSim.

### 1.3 Justificación

Resolviendo la necesidad de oxígeno medicinal para pacientes con problemas respiratorios y pacientes COVID se ve la necesidad de desarrollar el diseño de un concentrador portátil de oxígeno medicinal para la ciudad de La Paz y para nuestro territorio nacional, es necesario recalcar que el oxígeno medicinal es de suma importancia para el funcionamiento celular, una oxigenación insuficiente con lleva a la destrucción celular y a la muerte.

Todo esto se puede mitigar mediante la oxigenoterapia el cual consiste en el uso terapéutico del oxígeno medicinal siendo este la parte fundamental de una terapia respiratoria, ya que la finalidad de la oxigenoterapia es la de aumentar el aporte de oxígeno medicinal a nuestros tejidos utilizando al máximo la capacidad de transporte de la sangre arterial, para administrar convenientemente el oxígeno medicinal es necesario conocer la concentración del gas y utilizar un adecuado sistema de aplicación.

La oxigenoterapia domiciliaria supone una clara mejora en la calidad de vida aportando mayor autonomía y movilidad a los pacientes con problemas respiratorios sobrellevando de esta manera un efecto rehabilitador, por lo tanto el objetivo de diseñar un concentrador portátil de oxígeno medicinal para pacientes que fueron dados de alta o se encuentren en centros o recintos hospitalarios, teniendo en cuenta el bajo costo y que cumpla con las especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno medicinal publicado por la Organización Mundial de la Salud OMS la cual tiene que estar basada en la norma de la calidad del oxígeno de IBNORCA 73001, de

esta manera obtendremos oxígeno medicinal constante a partir del aire que respiramos.

### **1.3.1 Justificación económica**

Estos últimos años el precio y su predisposición del oxígeno medicinal fue muy reducido con precios bastante elevados por lo cual el diseño del concentrador portátil de oxígeno reflejara un impacto económico en la producción de oxígeno medicinal la cual se basa en la norma de la calidad de oxígeno de IBNORCA 73001, proporcionando oxígeno medicinal de elevada pureza lo cual ayudara de gran manera a pacientes con problemas respiratorios.

Los pacientes con problemas respiratorios al adquirir estos dispositivos aminorarán de forma directa e indirecta el costo del oxígeno medicinal además de tener una fuente constante de oxígeno medicinal resolviendo de esta manera la necesidad de dicho gas.

### **1.3.2 Justificación social**

La elaboración en el diseño del concentrador portátil de oxígeno medicinal para oxigenoterapia el cual será un dispositivo de manipulación simple al momento de generar oxígeno medicinal del medio ambiente a una elevada pureza y a un menor costo, beneficiando de gran manera a personas particulares y al sector de médico, además que este dispositivo será elaborado por personal capacitado entendido en el área logrando de esta manera generación de empleo y mano de obra en forma directa.

### **1.3.3 Justificación tecnológica**

Tomando en cuenta los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos a través de mi formación académica en mi casa de estudios con los cuales se podrá diseñar un concentrador portátil de oxígeno medicinal, el cual será de gran beneficio para los

pacientes con problemas respiratorios y de esta manera proporcionarles una pronta rehabilitación.

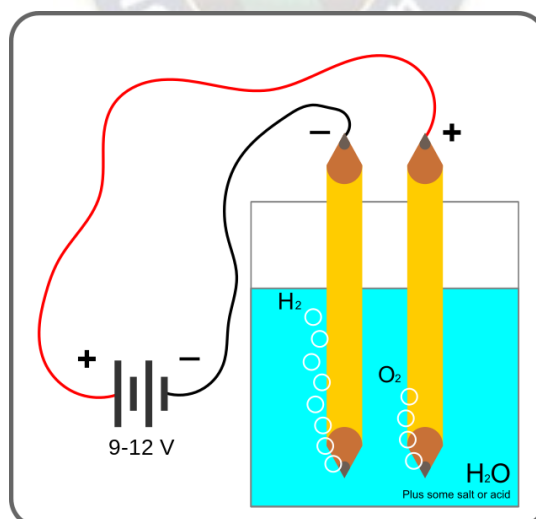
## 1.4 Características de solución

Al existir un incremento de pacientes con problemas respiratorios para los cuales es necesario manejar una pureza de oxígeno a niveles óptimos, los concentradores portátiles de oxígeno medicinal son dispositivos capaces de reproducir un flujo rico en oxígeno a partir del aire.

La obtención de oxígeno puede ser realizado mediante varios métodos, destacándose la electrolisis del agua, la destilación de aire licuado y la separación de gases por adsorción.

### 1.4.1 Oxígeno por la electrolisis del agua

Figura 1. Esquema de la electrólisis del agua



Fuente. [https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis\\_del\\_agua](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis_del_agua)

Nota. La gráfica representa la descomposición de oxígeno e hidrógeno al momento de transitar una corriente en presencia de electrolitos donde el ánodo (carga positiva) forma oxígeno y el cátodo (carga negativa) forma hidrógeno.

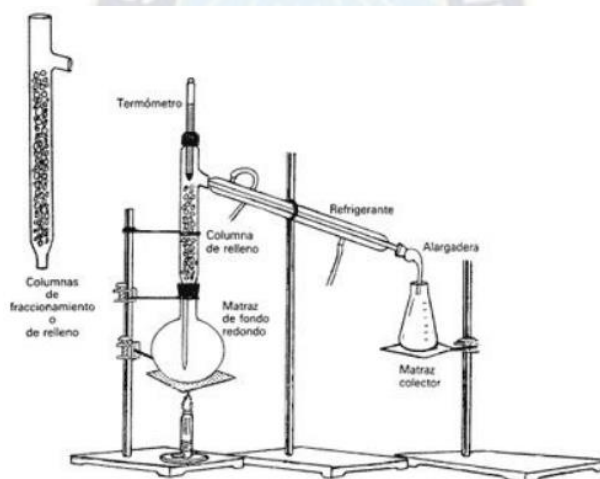


Procedo electroquímico la cual genera una descomposición de los elementos primarios al excitar los enlaces de una corriente eléctrica (la energía eléctrica forma reacciones químicas), este método permite la obtención de los elementos hidrogeno y oxígeno en estado gaseoso en relación de 2 a 1 en volumen correspondiente a la fracción estequiométrica de los elementos en la molécula del agua H<sub>2</sub>O.

### 1.4.2 Oxígeno por la destilación de aire licuado

Proceso termodinámico que permite separar las mezclas homogéneas con diferentes puntos de ebullición entre el nitrógeno y el oxígeno principales constituyentes del aire.

Figura 2. Esquema de la destilación de aire licuado



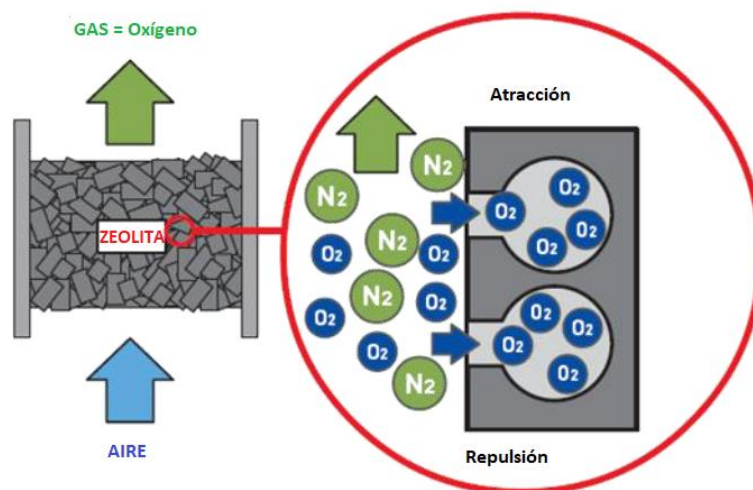
Fuente. <https://www.escolapedia.com/destilacion-fraccionada-del-aire/>

Nota. La gráfica representa al aire gaseoso el cual se convierte en líquido por licuefacción.

### 1.4.3 Oxígeno por el principio de separación de gases por adsorción

Proceso empleado para separar gases por la retención de componentes en la superficie porosa de un sólido, cuando un flujo interactúa con la superficie de un material se genera fuerzas de atracción o repulsión entre las moléculas del fluido y del material sólido obteniendo un producto a una alta pureza.

Figura 3. Esquema del principio de separación de gases por adsorción



Fuente.

[https://www.google.com/search?q=esquema+de+adsorci%C3%B3n+por+oscilasi%C3%B3n+de+presi%C3%B3n&tbm=isch&ved=2ahUKEwiG4a7ci737AhW-tJUCHaQLD1gQ2-cCegQIABAA&oq=esquema+de+adsorci%C3%B3n+por+oscilasi%C3%B3n+de+presi%C3%B3n&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoFCAAQgAQ6BwgAEIAEEBg6CwgAEIAEELEDEIMBOgYIABAIEB5Qp gdY4NUBYLzeAWgAcAB4AYABpQGIAAdkIkqEENjQuMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&scIent=img&ei=kl6Y4bqDr7p1sQPppe-wAU&bih=962&biw=2048#imgrc=Mb7fk\\_AQ2XvGRM](https://www.google.com/search?q=esquema+de+adsorci%C3%B3n+por+oscilasi%C3%B3n+de+presi%C3%B3n&tbm=isch&ved=2ahUKEwiG4a7ci737AhW-tJUCHaQLD1gQ2-cCegQIABAA&oq=esquema+de+adsorci%C3%B3n+por+oscilasi%C3%B3n+de+presi%C3%B3n&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoFCAAQgAQ6BwgAEIAEEBg6CwgAEIAEELEDEIMBOgYIABAIEB5Qp gdY4NUBYLzeAWgAcAB4AYABpQGIAAdkIkqEENjQuMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&scIent=img&ei=kl6Y4bqDr7p1sQPppe-wAU&bih=962&biw=2048#imgrc=Mb7fk_AQ2XvGRM)

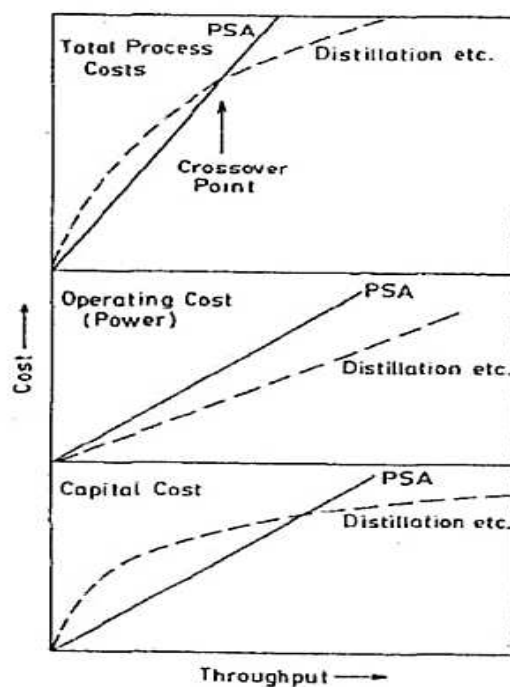
Nota. La gráfica representa al material poroso (zeolita) generando fuerzas de atracción y repulsión conservando las propiedades físicas de los componentes.

La solución planteada por el presente proyecto es la de PSA (Adsorción por Oscilación de Presión) del método de separación de gases el cual es un proceso de adsorción isotérmico, los cambios de presión permiten separar selectivamente componentes de una mezcla de gases, la principal ventaja de este ciclo respecto a otros es la rapidez al obtener mayores tasas de flujo de salida.

En general los procesos de separación de gases por adsorción suelen presentar un comportamiento lineal mientras que otros como la destilación del aire licuado presentan un comportamiento no lineal.

La simplicidad del proceso por separación de gas por adsorción con respecto a otros procesos lo propone como una de las opciones más viables de obtención y suministro de oxígeno medicinal de alta pureza ya que la adsorción ocurre debido a la interacción entre un gas y la estructura discontinua de un material sólido.

Figura 4. Flujo de salida para procesos de adsorción



Fuente. D. Ruthven, S. Farooq y K. Knaebel "Pressure Swing Adsorption" New York VCH Publishers 1994

Nota. La gráfica representa la variación de costos con respecto al flujo de salida para procesos de adsorción y destilación

## 1.5 Propósitos de la solución

La solución consiste en diseñar un dispositivo capaz de generar oxígeno medicinal de alta pureza para el uso en personas con problemas respiratorios en el tratamiento de la oxigenoterapia.

Este dispositivo es una tecnología nueva en el suministro de oxígeno medicinal y se transporta de manera fácil tanto para uso domiciliario y hospitalario, es un dispositivo eléctrico compacto el cual genera oxígeno medicinal a partir del aire del medio ambiente, utiliza un mini compresor de aire, un sistema neumático con dos celdas de zeolita y su parte electrónica – eléctrica con su parte de control, atrapa el aire del medio ambiente para luego convertirlo en oxígeno medicinal con caudales de suministro regulables de 0.5 hasta 10 litros por minuto como capacidad máxima, manteniendo una concentración de oxígeno constante a un elevado nivel de pureza basado en la norma de la calidad del oxígeno medicinal de IBNORCA además de ser

de fácil manipulación y bajo costo será el preferido por pacientes con problemas respiratorios a largo plazo.

## **1.6 Delimitación o límite**

Como se mencionó anteriormente nuestro alcance de estudio se limita a proponer el diseño de un concentrador portátil de oxígeno medicinal para oxigenoterapia con la cual se pueda suministrar una información práctica y eficiente desde los parámetros de diseño, tablas y fórmulas basándose en las especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno medicinal publicado por la Organización Mundial de la Salud OMS y la norma de IBNORCA sobre la calidad del oxígeno 73001 para la ciudad de La Paz manejado por un controlador programable placa de Arduino Uno el cual se encargará del sistema.

## **1.7 Limitaciones de la solución propuesta**

Con este proyecto de grado se pretende presentar una información práctica y resumida para el diseño de un concentrador portátil de oxígeno medicinal para oxigenoterapia al 90 % de pureza, sencillo, económico y de muy buena calidad para ser usado en pacientes con problemas respiratorios en la ciudad de La Paz.

Las características y dimensiones del dispositivo serán determinadas mediante un análisis experimental el cual debe ser eficiente desde tablas y fórmulas hasta llegar a su construcción experimental.

Este proyecto de grado usa 3 libras de zeolita 13X HP que se encuentra repartida en 2 celdas de zeolita, con una capacidad de 0.5 a 10 litros/minuto como capacidad máxima ideal regulable y debe contar con una pureza del 90 % para ser usado en pacientes con problemas respiratorios y pacientes COVID para el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas IIME ubicado en la ciudad de La Paz a una altura de 3625 m.s.n.m.

## CAPÍTULO II

### 2 Fundamento teórico

#### 2.1 Antecedentes

##### 2.1.1 Antecedentes Institucionales

El Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas IIME es una unidad dependiente de la Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, encargada de la investigación y desarrollo creada el 9 de septiembre de 1994 por resolución del Honorable Concejo Universitario HCU N° 133/94, tiene como misión planificar y ejecutar proyectos de investigación, postgrado e interacción social que permitan adquirir, generar y difundir conocimiento en los campos de aplicación de las Ingenierías Mecánicas y Electromecánicas, para apoyar la labor de formación y extensión académica de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la UMSA y ponerla al servicio de la región y Bolivia.

Además de fomentar las actividades de investigación docente estudiantil por pedido u oficio a través de la proposición, elaboración y ejecución de proyectos fomentando el trabajo de manera conjunta y separada contribuyendo de esta manera al desarrollo regional y nacional, identificando y priorizando las diferentes áreas aplicadas a las actividades productivas y de servicio industrial.

De esta manera surge el presente proyecto de grado el cual consiste en el diseño de un dispositivo que genere oxígeno medicinal confiable y eficiente para realizar la oxigenoterapia separando el oxígeno medicinal del ambiente (aire) para desarrollar un oxígeno medicinal de alta pureza al 90% usando como filtrante la zeolita 13X HP, reduciendo de esta manera la hospitalización y permitiendo de gran manera la rehabilitación en sus hogares, la ciudad de La Paz mantiene la medicina tradicional para curar ciertos problemas respiratorios y no fue la excepción la pandemia del COVID, nuestro país no cuenta con informaciones relacionadas al tema de estudio pero cuenta con plantas de generación de oxígeno medicinal como la que fue

implementada por el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas IIME a cargo del M. Sc. Ing. Jaime Sánchez.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Sistema Respiratorio**

Nuestro sistema respiratorio se encuentra conformado por dos estructuras que realizan el intercambio de los gases entre la atmósfera y la sangre, el oxígeno es introducido a nuestro cuerpo para ser distribuido entre nuestros tejidos, el dióxido de carbono producido por nuestro metabolismo celular es eliminado al exterior, este proceso de intercambio entre el oxígeno y el dióxido de carbono entre la sangre y la atmósfera recibe el nombre de respiración externa, el intercambio de gases entre la sangre de los capilares y las células de nuestros tejidos se llama respiración interna, los tractos respiratorios superior e inferior son los encargados de realizar el intercambio gaseoso y comprenden:

Tracto respiratorio superior:

- Nariz
- Cavidad nasal
- Laringe

Tracto respiratorio inferior:

- Tráquea
- Pulmones
- Bronquios
- Alvéolos pulmonares

## **2.2.1.1 Tracto respiratorio inferior**

### **2.2.1.1.1 Nariz**

Es la parte superior del sistema respiratorio variando de tamaño y forma dependiendo de la persona, calienta y humedece el aire que ingresa hacia los pulmones, la parte superior de la nariz es ósea llamado también puente de la nariz compuesta por los huesos nasales, parte del maxilar superior y la parte nasal del hueso frontal, su parte inferior es cartilaginosa.

En el interior de la nariz se encuentra el tabique nasal el cual es parcialmente óseo y parcialmente cartilaginoso dividiendo a la cavidad nasal en dos partes llamadas fosas nasales, la parte ósea del tabique nasal se encuentra formada por parte del hueso etmoides y el vómer encontrándose en el plano medio de las fosas nasales.

### **2.2.1.1.2 Laringe**

Órgano especializado en la fonación o emisión de sonidos con la ayuda de las cuerdas vocales situadas en su interior, localizada entre la laringofaringe y la tráquea actuando como una válvula que impide que los alimentos deglutidos y cuerpos extraños atraviesen a las vías respiratorias, se encuentra tapizada por una membrana mucosa y su esqueleto se encuentra formada por nueve cartílagos unidos entre sí por diversos ligamentos.

Su cavidad interior se extiende desde el orificio de entrada a la laringe hasta el borde inferior del cartílago cricoides en donde continua con la tráquea dividiéndose en tres partes por dos pliegues superiores (cuerdas vocales falsas) y dos pliegues inferiores (cuerdas vocales verdaderas) las cuales se proyectan al interior de la laringe.

## **2.2.1.2 Tracto respiratorio superior**

### **2.2.1.2.1 Tráquea**

Es un ancho tubo que continua a la laringe y se encuentra recubierta por una mucosa con epitelio pseudoestratificado columnar ciliado, la cavidad del tubo se mantiene abierta por medio de una serie de cartílagos hialinos (entre 16 a 20) en forma de C.

Los extremos abiertos de los anillos cartilagosos quedan estabilizados por fibras musculares lisas y tejidos conjuntivo elástico formando una superficie posterior plana en contacto directo con el esófago por delante del cual desciende, permitiendo acomodar dentro de la tráquea las expansiones del esófago producidas al tragar.

### **2.2.1.2.2 Bronquios**

Los bronquios principales son dos tubos formados por anillos de cartílago hialino para cada pulmón dirigiéndose abajo y afuera desde el final de la tráquea hasta los hilios pulmonares donde penetran a los pulmones.

El bronquio principal derecho es más vertical, corto y ancho que el izquierdo explicando que sea probable que un objeto aspirado ingrese al bronquio principal derecho, dentro de los pulmones los bronquios se dividen continuamente de modo que cada rama corresponde a un sector definido del pulmón.

Cada bronquio principal se divide en bronquios lobulares, dos de lado izquierdo y tres del lado derecho correspondientes a un lóbulo del pulmón, la mucosa del epitelio va cambiando a medida que se produce la ramificación bronquial, los anillos cartilagosos desaparecen y las fibras musculares lisas aumentan hasta que no existe cartílago y solo musculo liso en la pared de los bronquios pequeños, entonces la contracción muscular cierra la cavidad de estos bronquios impidiendo el ingreso de aire en los alvéolos.



### **2.2.1.2.3 Pulmones**

Los pulmones son órganos ligeros, blandos, esponjosos y elásticos que pueden reducir su tamaño cuando se abre la cavidad torácica, la primera parte de su vida son de color rosado y al final son de color oscuro debido a la acumulación de partículas de polvo inhalado, son los encargados de hacer ingresar el oxígeno del aire y de expulsar el dióxido de carbono del cuerpo realizando de esta forma el intercambio de los gases.

Cada pulmón tiene la forma de un semicono y separado uno del otro por el corazón y otras estructuras, presenta un vértice (polo superior redondeado de cada pulmón extendiéndose a través de la abertura superior del tórax), una base y dos caras, la base o cara diafragmática es cóncava y en forma de semiluna apoyándose en la superficie convexa del diafragma el cual separa al pulmón derecho del hígado y al pulmón izquierdo del hígado, estómago y bazo.

Las ramas de la arteria pulmonar distribuyen sangre venosa en los pulmones para poder oxigenarse acompañando a los bronquios, las ramas terminales de las arterias pulmonares se ramifican en capilares los cuales recubren las paredes de los alvéolos.

### **2.2.1.3 Fisiología**

El sistema respiratorio se divide en una zona respiratoria la cual realiza el intercambio de los gases entre el aire y la sangre y una zona de conducción, dicho intercambio de los gases sucede por las paredes de los alvéolos respiratorios, manteniendo el nivel del pH normal y eliminando líquidos del organismo.

### **2.2.1.4 Respiración**

La respiración es el nombre del proceso físico mediante el cual el organismo realiza un intercambio de diferentes gases llevando el oxígeno del aire a los pulmones y estos a las células del organismo deshaciendo el dióxido de carbono de los tejidos, transfiere

el oxígeno a las células que lo utilizan para para producir energía y deshacerse de los gases de desecho.

La respiración se divide en dos fases las cuales son la inspiración y la espiración los cuales constituyen el ciclo respiratorio el cual es posible a la mecánica respiratoria de los músculos del diafragma y los músculos intercostales los cuales permiten el ingreso del aire.

#### **2.2.1.4.1 Inspiración**

En la inspiración se realiza un intercambio de gases entre el oxígeno y el dióxido de carbono los cuales se realiza en los alvéolos pulmonares, toda la sangre del cuerpo pasa por los capilares uno o dos veces por minuto la sangre sufre una pérdida de dióxido de carbono y humedad ganando oxígeno, el mecanismo alveolar se encuentra muy balanceado manteniéndose entre 15% de oxígeno y 5.5 de dióxido de carbono por volumen, su función primordial del intercambio respiratorio es la de mantener estable la concentración de gases en la sangre, la sangre oxigenada pasa directamente al corazón el cual distribuye por todo el organismo.

El aire que se encuentra en el medio ambiente ingresa al cuerpo, llevando el oxígeno al organismo a través de los pulmones mediante una contracción de los músculos externos y el descenso del diafragma permitiendo el enriquecimiento de la sangre con oxígeno.

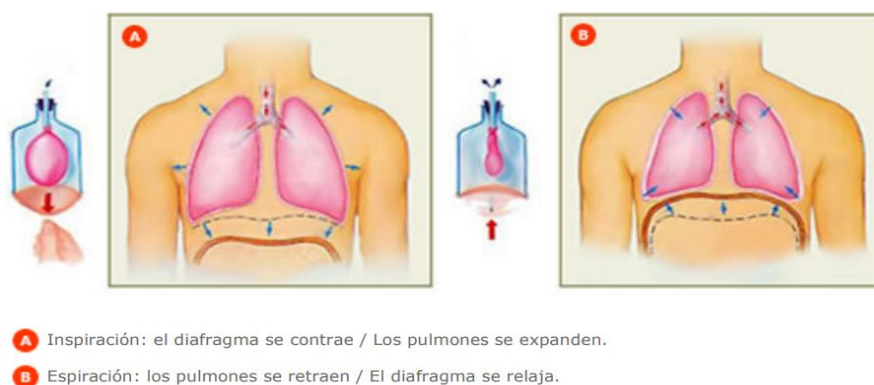
El diafragma se contrae y se mueve al inferior del abdomen permitiendo que los músculos externos se expandan abriendo de esta manera un espacio entre las costillas provocando un aumento en el volumen de la caja torácica, a su vez los pulmones se expanden cubriendo el volumen de la caja torácica y la presión intrapulmonar desciende por debajo de la presión atmosférica, los pulmones se llenan de aire para equilibrar ambas presiones.

### 2.2.1.4.2 Espiración

Luego de la inspiración los músculos del diafragma se relajan contrayéndose hasta adentro, la caja torácica reduce su volumen al igual que los pulmones aumentando la presión intrapulmonar superando de esta manera a la presión del medio ambiente resultando en la liberación de gases de los pulmones al ambiente.

La espiración o exhalación es el proceso por el cual el cuerpo elimina el dióxido de carbono mediante una corriente respiratoria, es un proceso pasivo y puede ser voluntaria e involuntaria.

Figura 5. Esquema de la Inspiración y Espiración



Fuente. Thibodeau G.A., Patton K.T. Anatomía y Fisiología. Segunda edición, Madrid 1995

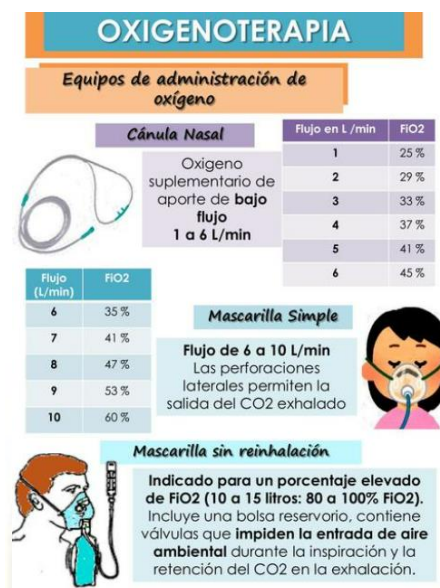
Nota. Etapa del proceso de la respiración que consiste en el flujo de aire hacia adentro y hacia afuera de los pulmones, es decir la inspiración y espiración.

### 2.2.2 Oxigenoterapia

La oxigenoterapia es el tratamiento médico terapéutico de algunas enfermedades que se fundamentan en la aplicación de inhalaciones de oxígeno medicinal en concentraciones elevadas para tratar o prevenir los síntomas y las manifestaciones de personas con problemas respiratorios o deficiencia de oxígeno en la sangre, aumenta la cantidad de oxígeno que reciben los pulmones administrándose por periodos largos o cortos ya sea en un centro hospitalario o en su hogar, “La

oxigenoterapia consiste en la administración de oxígeno medicinal concentrado al paciente para mejorar y estabilizar la saturación de este gas en la sangre”.

Figura 6. Esquema de flujos de oxígeno



Fuente. [https://www.google.com/search?q=oxigenoterapia+imagenes&sxsrf=ALeKk00JFNOSVmt-InOYhm3s\\_60H3QW1Sq:1623124809057&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiT0a2Nk4fxAhXRHrkGHfsdC2wQ\\_AUoA](https://www.google.com/search?q=oxigenoterapia+imagenes&sxsrf=ALeKk00JFNOSVmt-InOYhm3s_60H3QW1Sq:1623124809057&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiT0a2Nk4fxAhXRHrkGHfsdC2wQ_AUoA)

*Nota. Este esquema médico representa la fracción inspirada de oxígeno (FIO<sub>2</sub>) es la concentración o proporción de oxígeno en la mezcla de aire inspirado. Por ejemplo, si el volumen corriente de un paciente es de 500ml y está compuesto por 250ml de oxígeno, la FIO<sub>2</sub> es del 50%*

Existen 2 tipos de oxigenoterapia las cuales son:

- Oxigenoterapia normobárica, administra oxígeno en distintas concentraciones.
- Oxigenoterapia hiperbárica, administra oxígeno al 100% mediante mascarilla o casco.

La oxigenoterapia consiste en la administración de oxígeno concentrado al paciente para mejorar y estabilizar la saturación de este gas en la sangre (OMS, 2016).

### 2.2.3 Concentrador de oxígeno portátil

Un concentrador portátil de oxígeno es un dispositivo médico autónomo que produce oxígeno medicinal al instante sin necesidad de almacenar en su interior y se encuentra alimentado por electricidad, representa una opción favorable en la administración continua de oxígeno medicinal a los pacientes en rehabilitación mejorando de esta manera su estabilización y saturación de oxígeno en la sangre, utiliza el proceso de adsorción por oscilación de presión PSA extrayendo aire del medio ambiente la cual pasa a través de tamices moleculares (zeolita 13X HP), los cuales se encargan de filtrar el aire del medio ambiente reteniendo las moléculas de hidrógeno y dejando pasar solo las moléculas de oxígeno, este último llega a alcanzar concentraciones terapéuticas las cuales se encuentran establecidas bajo la norma de calidad de oxígeno medicinal de IBNORCA.

Tabla 3. Características del concentrador

Datos	
Presión de operación	45 - 50 PSI
Masa de zeolita	3 Libras
Caudal de salida	1 - 10 Lt/min
Caudal del compresor	25 Lt/min

Fuente. Elaboración propia

Nota. Este cuadro especifica las características del concentrador portátil de oxígeno

#### 2.2.3.1 Electroválvulas

Una electroválvula es una válvula electromecánica principalmente diseñada para controlar el paso de un fluido por medio de un conducto o tubería, se mueve por medio de una bobina solenoide y cuenta solo con 2 posiciones abierto y cerrado.

Figura 7. Electroválvula 5/2



Fuente. Catalogo Sawers Bolivia

Nota. Estas electroválvulas son de retorno por muelle monoestables o solenoides

Estas electroválvulas conmutan (sustituyen) reaccionando a las señales de salida del sistema de control (Arduino Uno), cerrando o abriendo el paso del fluido en el sistema neumático.

### 2.2.3.2 Acumulador o depósito de aire

Figura 8. Acumulador de aire



Fuente. <https://www.fisaliscompresores.com/tratamiento-de-aire-comprimido/depositos-acumuladores/>

Se encarga fundamentalmente de almacenar, refrigerar y distribuir el aire comprimido proporcionada por el compresor para cuando la demanda momentánea exceda la capacidad del compresor (intervalos de descanso del compresor), la capacidad de almacenamiento depende del volumen y la presión que pueda soportar para la cual fue diseñado manteniendo constantes el caudal y presión requeridos por el dispositivo.

### 2.2.3.3 Humidificador

El humidificador tiene la finalidad de proporcionar humedad requerida al oxígeno que se brinda al paciente durante una terapia respiratoria, la humidificación es valiosa porque evita que el oxígeno ingrese seco por la vía respiratoria causando irritación además en el vaso humidificador se introduce agua destilada estéril aproximadamente 2/3 de su capacidad, se puede utilizar en combinación con mascarillas, gafas nasales y conexión traqueal.

Figura 9. Humidificador de oxígeno




Fuente. <https://hpmedical.com.bo/es/cuidados-generales/50-humidificador.html>

### 2.2.3.4 Compresor

Equipo que consta de un motor pequeño de compresión que suministra aire constante y es libre de aceite (compresor a pistón).

Tabla 4. Características del compresor

Compresor	
Modelo	HC80A
Fabricante	Gleeman
Potencia de entrada	$\leq 100$ W
Flujo de aire	25 Lt/min
Temperatura de trabajo	(-5 -40) °C
Ruido	$\leq 48$ Db (A)
Voltaje	110 - 220 V
Peso	2.25 Kg
Dimensión	150 × 95 × 135 mm
Presión de trabajo	4 bar - 60 PSI
Costo	850 Bs

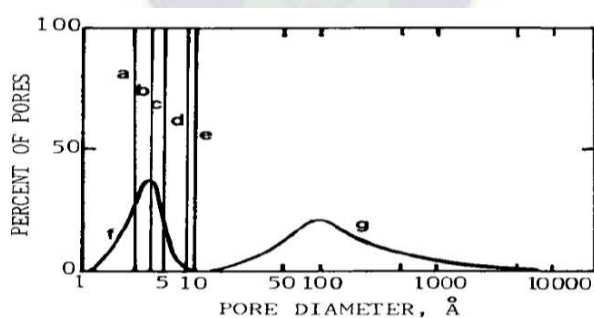


Fuente. Elaboración propia

Nota. Este cuadro especifica las características del compresor Hc80a

### 2.2.3.5 Zeolita

Figura 10. Distribución del tamaño de microporos zeolita tipo 3A (a), 4A (b), 5A (c), 10X (d), 13X (e) tamiz molecular del carbono (f) el carbono activado (g)



Fuente. R. Yang "Gas separation by adsorption processes" Stoneham butterworth Publishers 1986

Nota. En la figura se presentan los tamaños de poros característicos de zeolita y otros adsorbentes comúnmente utilizados

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos cuya estructura permite la formación de cavidades o poros que oscila entre 6 a 12 Å Angstrom debido a una distribución homogénea, dentro de éstas existen posiciones las cuales pueden ser ocupadas por iones y moléculas de agua, el tamaño de los canales de los poros permite la transferencia de materia entre el espacio intercrystalino y el medio que lo rodea,



pueden ser de origen natural o sintético, las zeolitas naturales se forman como resultado de las erupciones volcánicas mediante reacciones hidrotérmicas de rocas volcánicas de silicio y ricas en álcalis.

“Son aluminosilicatos cristalinos de alta micro porosidad ocupada por especies catiónicas de naturaleza alcalina tales como el sodio, potasio y calcio!”. [5]

Figura 11. Zeolita 13X HP Molecular Sieve



Fuente. Sani Importadores Perú

Las zeolitas se encuentran en la naturaleza como minerales y se conocen alrededor de 40 tipos diferentes, la estructura de la zeolita consiste en un tetraedro de silicato y tetraóxido de aluminio unidos entre sí por átomos de oxígeno compartidos.

En la elaboración de la etapa de separación de oxígeno se utilizará 2 celdas o recipientes llenos de zeolita la cual se encargará de filtrar y retener el nitrógeno y liberar el oxígeno, la zeolita a utilizar es la 13X HP debido que tiene un uso normal para la purificación del oxígeno, adsorbe más nitrógeno y menos oxígeno.

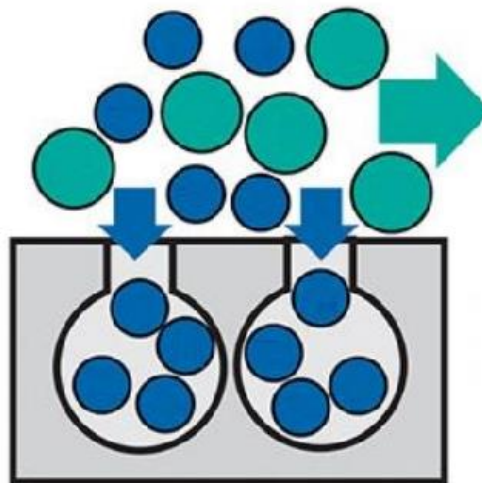
#### 2.2.4 Fundamento de la adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida) considerado como un fenómeno de superficie, la sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se denomina adsorbato y la fase sólida se llama adsorbente.

La adsorción es el resultado de la interacción del sólido (adsorbente) y las moléculas en solución y se debe a las fuerzas intermoleculares sin balancear entre las moléculas que se encuentran en la superficie de un sólido y un fluido (interfase), hasta lograr el equilibrio entre las fuerzas atractivas y la energía de superficie del adsorbente.

La separación por mecanismo estérico (estructura espacial de una molécula que impide o retarda la conexión con otra molécula) usualmente en zeolitas permite un rango elevado de selección debido a la variedad de estructuras cristalinas las cuales permiten atrapar moléculas de diferente geometría, este mecanismo estérico se produce cuando las moléculas interactúan con un tamiz molecular (zeolita 13X HP).

Figura 12. Mecanismo de adsorción estérico



Fuente. D. Ruthven, S. Farooq y K. Knaebel "Pressure Swing Adsorption" New York VCH Publishers 1994

Nota. La figura presenta la difusión de moléculas en la estructura de un tamiz molecular

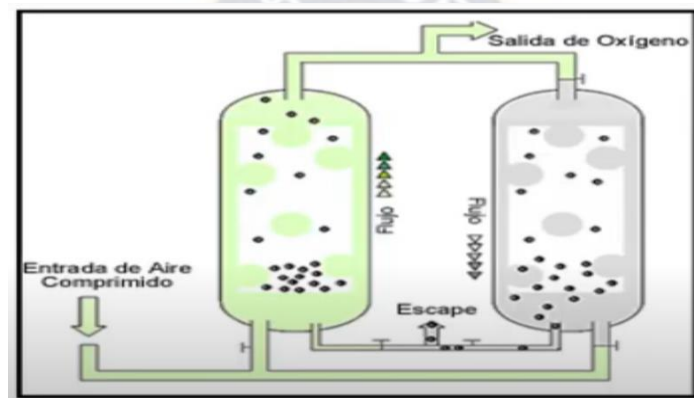
"El fenómeno de separación por adsorción se produce por los mecanismos estéricos, cinéticos o de equilibrio". [3]

"La adsorción por el mecanismo de equilibrio ocurre debido a la naturaleza de la interacción entre la molécula adsorbida y la superficie sólida según su naturaleza puede ser categorizada por adsorción física o química". [3]

### 2.2.5 Adsorción por Oscilación de Presión (PSA)

El proceso de adsorción por oscilación de presión PSA es un proceso de separación selectiva mediante el cual es posible separar uno o más componentes de un flujo de alimentación heterogénea, el proceso de adsorción por oscilación de presión PSA es el más utilizado para la separación del aire involucrado tres etapas principales la adsorción o producción, regeneración o desorción y la purga:

Figura 13. Esquema estándar del proceso PSA



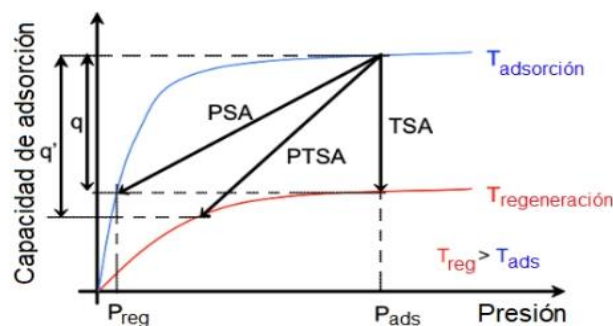
Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=oEov3iqZHEM>

Nota. La figura representa las etapas del proceso de Adsorción por Oscilación de Presión desarrollada por Skartrom en 1960

- **La etapa de adsorción o producción** durante la cual el gas adsorbido (oxígeno) se recoge del medio ambiente y los componentes no deseados son retirados de la mezcla debido a su interacción con el tamiz molecular o adsorbente (zeolita 13X HP).
- **La etapa de regeneración o desorción** durante la cual el segundo gas separado (nitrógeno) el cual se encuentra atrapado por el tamiz molecular o adsorbente (zeolita 13X HP) que le impide el paso se elimina de la celda, regenerando de esta manera el adsorbente para el siguiente ciclo.
- **Etapa de purga** durante esta etapa se libera todos los demás compuestos retenidos del aire por la zeolita en el proceso de adsorción al medio ambiente.

El proceso de adsorción por oscilación de presión separa el oxígeno y el nitrógeno del aire debido a la diferencia en la adsorción de oxígeno y nitrógeno en los adsorbentes (zeolita 13X HP) a presión diferente por encima de la presión atmosférica en la ciudad de La Paz de 495 mmHg (milímetros de mercurio), este ciclo de adsorción por oscilación de presión PSA trabaja a temperatura ambiente, al pasar el aire por cada celda de zeolita 13X HP el nitrógeno es retenido y el oxígeno pasa sin quedar atrapado saliendo por el otro extremo de la celda de zeolita, la pureza del oxígeno medicinal no solo depende del adsorbente utilizado, las electroválvulas de control utilizadas también contribuyen considerablemente al igual que la presión la cual activa las propiedades adsorbentes de la zeolita 13X HP.

Figura 14. Esquema de operación de los procesos PSA, TSA y PTAS



Fuente. C. Fernandez Martín "The Promising Application of Microwaves in Carbon Capture and Storage" Ampere Newaletter, 10 de octubre 2016 pg. 19 – 21

Nota. La figura representa los conceptos de operación de los procesos PSA, TSA y PTSA en el cual la presión y temperatura oscilan simultáneamente

“El proceso (PSA) Adsorción por Oscilación de Presión opera en condiciones aproximadamente isotérmicas lo cual lo hace más eficiente energéticamente con respecto al proceso (TSA) Adsorción por Oscilación de Temperatura, dado que en este otro proceso los ciclos de calentamiento y de enfriamiento de los gases requiere una gran cantidad de energía”. [6]

En los procesos de separación (PSA) Adsorción por Oscilación de Presión a diferencia de otros métodos de separación no posee un comportamiento de estado estacionario es decir sus variables no permanecen invariantes en el tiempo por lo tanto el diseño y

escalonamiento del proceso se describe a partir de una serie de ecuaciones diferenciales que relacionan el rendimiento y las variables operacionales.

“Las limitaciones del proceso son los adsorbentes dado que algunas especies químicas tienen interacciones débiles con los tamices moleculares los resultados de concentración de hidrogeno pueden generar productos de hasta un 99% de refinamiento, para la concentración de nitrógeno se obtienen productos de 99.5 a 99% de pureza por otro lado la concentración de oxígeno e 80 a 95% de pureza, en este último el porcentaje residual suele estar compuesto por argón”. [2] Para las aplicaciones de separación de aire los absorbentes más comunes son la zeolita y el tamiz molecular de carbono debido a su capacidad de retirar el nitrógeno y el oxígeno respectivamente.

### **2.3 Metodología, herramientas y ambiente de desarrollo**

El presente proyecto es de tipo experimental teniendo control pleno de las variables (presión, caudal de aire, volumen másico de la zeolita, pureza del oxígeno y caudal de salida), también cuenta con un proceso descriptivo el cual busca especificar las características y la norma mediante la cual especifica la calidad del oxígeno emitida por IBNORCA llevando a cabo las siguientes actividades:

- Recabar información acerca de los concentradores portátiles de oxígeno en base a artículos de investigación, proyectos de grado, empresas encargadas de vender estos dispositivos, libros y videos de YouTube.
- Determinar los parámetros del diseño de los diferentes sistemas que compone el dispositivo para el presente proyecto.
- Calcular y dimensionar elementos que conforman los sistemas del proyecto
- Realizar los diferentes planos de los sistemas que conforman el presente proyecto.
- Especificar los componentes los cuales se comprará para realizar la construcción experimental.
- Cotizaciones y costo.

También presenta una metodología deductiva por el cual nos enfocamos en parámetros específicos (pureza de oxígeno, cantidad de zeolita, caudal de entrada, caudal de salida) los cuales proporcionarán un producto de calidad y alterando estos parámetros proporcionarán lo contrario.

El desarrollo del presente diseño del concentrador portátil de oxígeno para oxigenoterapia se realizará con paquetes computacionales o softwares tales como el SolidWorks con el cual se diseñará las celdas de zeolita, el acumulador, las tapas de cada celda y la caja o carcasa, Proteus con el cual simularemos los componentes electrónicos vinculados con la parte de control, Arduino Uno el cual se encargará de la parte de control, Festo FluidSim con el cual diseñaremos la parte del sistema neumático. Se realizará una construcción experimental (prototipo) con el cual pretendo realizar un modelo del proceso independiente como una técnica susceptible a implementarse para lo cual se requiere comprar diversos componentes del mercado para tal caso el gasto correrá por parte mía.

El área o ambiente donde se desarrolla el presente proyecto es en la ciudad de La Paz, ciudad que se encontró en el epicentro de los problemas dados por la infección viral del COVID – 19 y la demanda de recintos hospitalarios, suministros tales como el oxígeno medicinal el cual no logro abastecer por completo a la ciudad de La Paz, esto debido a los problemas suscitados por los bloqueos, requerimiento de los recintos hospitalarios y sector privado.

## CAPÍTULO III

### 3 Ingeniería del proyecto

#### 3.1 Parámetros de diseño

El concentrador portátil de oxígeno debe ser capaz de generar oxígeno medicinal en base a la norma de calidad de oxígeno 73001 de IBNORCA, los diferentes parámetros de diseño son evaluados tomando en cuenta las necesidades principales a las cuales se quiere adaptar el concentrador portátil de oxígeno.

El concentrador portátil de oxígeno en la ciudad de La Paz que se encuentra a una altura de 3625 m.s.n.m. donde las condiciones ambientales no llegan a los 40 °C y 95 % de humedad relativa esto debido a que la temperatura y la humedad relativa tiende a disminuir a elevadas altitudes, al mismo tiempo las presiones parciales de oxígeno en la atmósfera son menores a elevadas altitudes por ende los pacientes con problemas respiratorios que se encuentren a este nivel de altitud necesitarán elevadas tasas de flujo de oxígeno medicinal para recibir un tratamiento adecuado.

##### 3.1.1 Dimensiones principales del concentrador de oxígeno portátil

Por razones de ergonomía (condiciones de adaptación de un lugar de trabajo) se opta por una altura de 540 mm, 400 mm de largo y 300 mm de ancho se definirá de acuerdo al diseño de los subsistemas mecánicos, el cual queda restringido por el compresor sistema que se encarga de proporcionar el aire del ambiente a las celdas de zeolita 13X HP.

Figura 15. Diseño de la caja



Fuente. Elaboración propia

## Geometría general

Tabla 5. Dimensiones generales

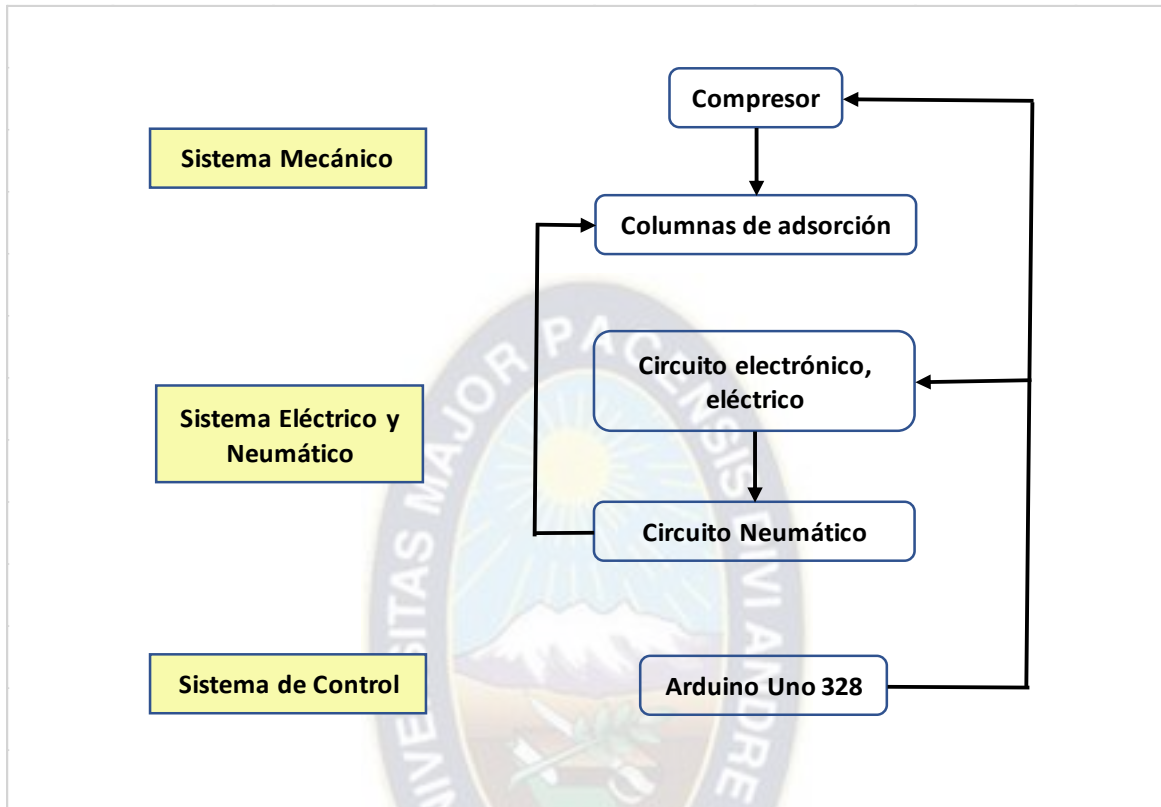
Descripción	Unidad	Dimensión
Altura	mm	540
Largo	mm	400
Ancho	mm	300

Fuente. Elaboración propia



### 3.2 Sistemas y subsistemas

Figura 16. Sistemas y subsistemas



Fuente. Elaboración propia

Para el diseño mecánico se divide el concentrador portátil de oxígeno en el subsistema

- Sistema mecánico.
- Sistema eléctrico y neumático.
- Sistema de control.

Dentro de los sistemas señalados se encuentran los correspondientes subsistemas y mecanismos descritos a continuación:

### 3.2.1 Sistema mecánico


#### 3.2.1.1 Columnas de adsorción

Las celdas de zeolita son de vital importancia tomando en cuenta el cálculo de sus dimensiones debido a que se encuentra relacionado con la capacidad de adsorción cuando se encuentra llena del mineral zeolita 13X HP el cual se encarga de filtrar el oxígeno y retener el nitrógeno, este mineral poroso será usado como un reactor, para su dimensionamiento se utilizaron 3 libras de zeolita 13X HP para tamiz molecular, partiendo de este dato se calculará las dimensiones de las celdas de zeolita.

Tabla 6. Especificaciones de la zeolita

Parámetro técnico	
Modelo	13X HP
Color	Gris claro
Diámetro del poro nominal	10 anstrong
Forma	Esfera (bola)
Diámetro (mm)	0.4 - 0.8
Densidad (g/ml)	≥ 0.62
Capacidad (ml/g) $N_2$	≥ 8
Selectividad $N_2/O_2$	≥ 3

**13XHP Molecular sieve:**



Fuente. Elaboración propia

Ecuación de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

Volviéndolo a una ecuación cúbica

$$PV^3CV^2 + aV - ab = 0 \quad 3.1$$

$$P_{O_2} V_{O_2} - (P_b + RT)V_{O_2}^2 + aV_{O_2} - ab = 0$$

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals con los datos del compresor tenemos



Hallando el volumen específico de oxígeno en el punto 1

$$P_{O_2(1)} V_{O_2(1)} - (P_b + RT)V_{O_2(1)}^2 + aV_{O_2(1)} - ab = 0$$

$V_{O_2(1)}$  = Volumen específico de oxígeno en el punto 1

$P_{O_2(1)}$  = Presión de oxígeno en el punto 1

$$P_{O_2(1)} = X_{O_2(1)} \times P_C$$

$X_{O_2(1)}$  = Concentración de oxígeno del aire 21%

$P_C$  = Presión del compresor 60 PSI

$$P_{O_2(1)} = 0.21 \times 60 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 0.84 \text{ bar}$$

$$P_{O_2(1)} = 0.84 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación 1

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{ }^\circ\text{K} \times \text{mol}}$$

$$V_{O_2(1)} = 28.431 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Hallando el número de moles de oxígeno en el punto 1

$$n_{O_2(1)} = \frac{Q_1}{V_{O_2(1)}} = \frac{25 \text{ l/min}}{28.431 \text{ l/mol}} = 0.8793 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{O_2(1)} = 0.8793 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Hallando la masa de oxígeno en el punto 1

$$m_{O_2(1)} = n_{O_2(1)} \times M_{O_2}$$

$$m_{O_2(1)} = \text{Masa de oxígeno en el punto 1}$$

$n_{O_2(1)}$  = Número de moles de oxígeno en el punto 1

$M_{O_2}$  = Peso molecular del oxígeno  $32 \frac{g}{mol}$

$$m_{O_2(1)} = 0.8793 \frac{mol}{min} \times 32 \frac{g}{mol} = 28.1376 \frac{g}{min}$$

$$m_{O_2(1)} = 28.1376 \frac{g}{min}$$

Hallando el número de moles totales a la entrada en el punto 1

$$n_1 = \frac{n_{O_2(1)}}{X_{O_2(1)}}$$

$n_1$  = Número total de moles en el punto 1

$$n_1 = \frac{0.8793 \frac{mol}{min}}{0.21} = 4.1872 \frac{mol}{min}$$

$$n_1 = 4.1872 \frac{mol}{min}$$

Hallando el número de moles de nitrógeno en el punto 1

$$n_{N_2(1)} = X_{N_2(1)} \times n_1$$

$n_{N_2(1)}$  = Número de moles de nitrógeno en el punto 1

$X_{N_2(1)}$  = Concentración de nitrógeno del aire 79%

$$n_{N_2(1)} = 0.79 \times 4.1872 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 3.3079 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{N_2(1)} = 3.3079 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Hallando la masa de nitrógeno en el punto 1

$$m_{N_2(1)} = n_{N_2(1)} \times M_{N_2}$$

$m_{N_2(1)}$  = Masa de nitrógeno en el punto 1

$n_{N_2(1)}$  = Número de moles de nitrógeno en el punto 1

$M_{N_2}$  = Peso molecular del nitrógeno  $28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

$$m_{N_2(1)} = 3.3079 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 92.6208 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$m_{N_2(1)} = 92.6208 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Hallando la masa total en el punto 1

$$m_1 = m_{O_2(1)} + m_{N_2(1)}$$

$$m_1 = 28.1376 \frac{\text{g}}{\text{min}} + 92.6208 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 120.758 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$m_1 = 120.758 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Hallando la selectividad

$$S = \frac{n_{N_2}}{n_{O_2}} = \frac{0.9}{0.1} = 9$$

$$S = 9$$

Hallando en número de moles totales en el punto 2

$$n_2 = n_1 \times \frac{X_{O_2(1)} \times S - X_{N_2(1)}}{X_{O_2(2)} \times S - X_{N_2(2)}}$$

$n_2$  = Número de moles totales en el punto 2

$S$  = Selectividad

$X_{O_2(2)}$  = Concentración de oxígeno 93%

$X_{N_2(1)}$  = Concentración de nitrógeno 7%

$$n_2 = 4.1872 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times \frac{0.21 \times 9 - 0.79}{0.93 \times 9 - 0.07} = 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_2 = 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Hallando el número de moles de oxígeno en el punto 2

$$n_{O_2(2)} = X_{O_2(2)} \times n_2$$

$$n_{O_2(2)} = 0.93 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 0.516 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{O_2(2)} = 0.516 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Hallando el número de moles de nitrógeno en el punto 2

$$n_{N_2(2)} = X_{N_2(2)} \times n_2$$

$$n_{N_2(2)} = 0.07 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 0.039 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{N_2(2)} = 0.039 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Hallando la masa de oxígeno en el punto 2

$$m_{O_2(2)} = n_{O_2(2)} \times M_{O_2}$$

$$m_{O_2(2)} = 0.516 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 16.512 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$m_{O_2(2)} = 16.512 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Hallando la masa de nitrógeno en el punto 2

$$m_{N_2(2)} = n_{N_2(2)} \times M_{N_2}$$



$$m_{N_2(2)} = 0.039 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1.092 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$m_{N_2(2)} = 1.092 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Hallando la masa total en el punto 2

$$m_2 = m_{O_2(2)} + m_{N_2(2)}$$

$$m_1 = 16.512 \frac{\text{g}}{\text{min}} + 1.092 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 17.604 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$m_1 = 17.604 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Halando el volumen específico de oxígeno en el punto 2

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals

$$P_{O_2(2)} V_{O_2(2)} - (P_b + RT) V_{O_2(2)}^2 + a V_{O_2(2)} - ab = 0$$

$V_{O_2(2)}$  = Volumen específico de oxígeno en el punto 2

$P_{O_2(2)}$  = Presión de oxígeno en el punto 2

$$P_{O_2(2)} = X_{O_2(2)} \times P_2$$

$X_{O_2(2)}$  = Concentración de oxígeno 93%

$P_2$  = Presión de trabajo 50 PSI

$$P_{O_2(2)} = 0.93 \times 50 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 3.1 \text{ bar}$$

$$P_{O_2(2)} = 3.1 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación cúbica de Van der Waals

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{ }^\circ\text{K} \times \text{mol}}$$

$$V_{O_2(2)} = 7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Hallando el caudal  $Q_2$

$$Q_2 = V_{O_2(2)} \times n_{O_2(2)}$$

Sabemos

$$n_{O_2(2)} = X_{O_2(2)} \times n_2$$

Reemplazando tenemos  $Q_2$

$$Q_2 = 0.93 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}} = 3.966 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$Q_2 = 3.966 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Hallando el caudal  $Q_4$

$$Q_4 = 0.7 \times Q_2$$

$$Q_4 = 0.7 \times 3.966 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 2.776 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$Q_4 = 2.776 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Hallando el volumen específico de oxígeno en el punto 4

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals

$$P_{O_2(4)} V_{O_2(4)} - (P_b + RT) V_{O_2(4)}^2 + a V_{O_2(4)} - ab = 0$$

$V_{O_2(4)}$  = Volumen específico de oxígeno en el punto 4

$P_{O_2(4)}$  = Presión de oxígeno en el punto 4

$$P_{O_2(4)} = X_{O_2(4)} \times P_4$$

$X_{O_2(4)}$  = Concentración de oxígeno 93%

$P_4$  = Presión de trabajo 50 PSI

$$P_{O_2(4)} = 0.93 \times 50 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 3.1 \text{ bar}$$

$$P_{O_2(4)} = 3.1 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación cúbica de Van der Waals

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{K} \times \text{mol}}$$

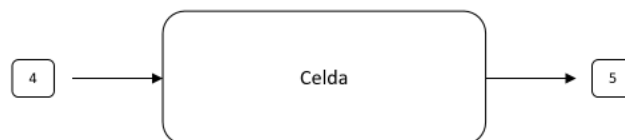
$$V_{\text{O}_2(4)} = 7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Hallando el número de moles de oxígeno en el punto 4

$$n_{\text{O}_2(4)} = \frac{Q_4}{V_{\text{O}_2(4)}} = \frac{2.776 \text{ l/min}}{7.685 \text{ l/mol}} = 0.3613 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{\text{O}_2(4)} = 0.3613 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Realizando el balance de materia en el acumulador



$$[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$$

[E] = Entrada

[S] = Salida

[P] = Produce

[C] = Consume

[A] = Acumulador

$$[E] = [A]$$

$$m_{O_2(4)} = \frac{dm_{O_2}}{dt}$$

La masa es equivalente

$$m = n \times M$$

m = Masa

n = Número de moles

M = Peso molecular

$$n_{O_2(4)} \times M_{O_2} = \frac{d(n_{O_2} \times M_{O_2})}{dt}$$

$$n_{O_2(4)} = \frac{dn_{O_2}}{dt}$$

$$n_{O_2(4)} \times \int_0^t dt = \int_{n_{O_2(5)}}^{n_{O_2(4)}} dn_{O_2}$$

$$n_{O_2(4)} \times t = n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}$$

Sabemos

$$n = \frac{V_A}{V}$$

$n$  = Número de moles

$V_A$  = Volumen del acumulador

$V$  = Volumen específico

### Tiempo de llenado del acumulador solo acumulando

$$t = \frac{\frac{V_A}{V_{O_2(4)}} - \frac{V_A}{V_{O_2(5)}}}{n_{O_2(4)}}$$

$$t = \frac{V_A}{n_{O_2(4)}} \times \left( \frac{1}{V_{O_2(4)}} - \frac{1}{V_{O_2(5)}} \right) \quad 3.2$$

Halando el volumen específico de oxígeno en el punto 5

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals

$$P_{O_2(5)}V_{O_2(5)} - (P_b + RT)V_{O_2(5)}^2 + aV_{O_2(5)} - ab = 0$$

$V_{O_2(5)}$  = Volumen específico de oxígeno en el punto 5

$P_{O_2(5)}$  = Presión de oxígeno en el punto 5

$$P_{O_2(5)} = X_{O_2(5)} \times P_5$$

$X_{O_2(5)}$  = Concentración de oxígeno 93%

$P_5$  = Presión de salida 10 PSI

$$P_{O_2(4)} = 0.93 \times 10 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 0.62 \text{ bar}$$

$$P_{O_2(4)} = 0.62 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación cúbica de Van der Waals

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{ }^\circ\text{K} \times \text{mol}}$$

$$V_{O_2(5)} = 38.529 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Hallando el número de moles de oxígeno en el punto 5 salida

$$n_{O_2(5)} = \frac{Q_5}{V_{O_2(5)}} = \frac{10 \text{ l/min}}{38.529 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} = 0.2595 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{O_2(5)} = 0.2595 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Reemplazando en la ecuación 2

$$t = \frac{V_A}{n_{O_2(4)}} \times \left( \frac{1}{V_{O_2(4)}} - \frac{1}{V_{O_2(5)}} \right)$$

$$t = \frac{1368.11 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ cm}^3}}{0.3613 \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \times \left( \frac{1}{7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} - \frac{1}{38.529 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} \right) = 0.3944 \text{ min}$$

$$t = 0.3944 \text{ min}$$

$$t = 23.664 \text{ seg}$$

**El tiempo de llenado del acumulador es de 23.664 segundos tomando en cuenta que solo acumula y no tiene salida**

Realizando el balance de materia en la celda

$$[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$$

[E] = Entrada

[S] = Salida

[P] = Produce

[C] = Consume

[A] = Acumulador

$$[E] = [A]$$

$$m_{O_2 (1)} - m_{O_2 (2)} = \frac{dm_{O_2}}{dt}$$

La masa es equivalente

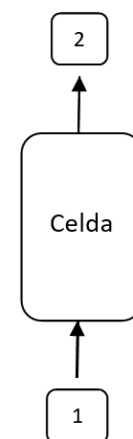
$$m = n \times M$$

m = Masa

n = Número de moles

M = Peso molecular

t = Tiempo de llenado del acumulador 0.3944 min





$$n_{O_2(1)} \times M_{O_2} - n_{O_2(2)} \times M_{O_2} = \frac{d(n_{O_2} \times M_{O_2})}{dt}$$

$$n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)} = \frac{dn_{O_2}}{dt}$$

$$(n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)}) \int_0^t dt = \int_0^{n_{O_2}} dn_{O_2}$$

$$n_{O_2} = (n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)}) \times t$$

Sabiendo

$$n_i = X_i \times n$$

$$n_{O_2} = (n_{O_2(1)} \times n_1 - n_{O_2(2)} \times n_2) \times t \quad 3.3$$

$$n_{O_2} = \left( 0.21 \times 4.1872 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 0.93 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right) \times 0.3944 \text{ min} = 0.1433 \text{ mol}$$

$$n_{O_2} = 0.1433 \text{ mol}$$

**Determinación de la masa mínima de zeolita para la obtención de oxígeno concentrado al 93% a una presión de 50 PSI**

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{mínima}}} = \frac{V_{N_2}}{C} \quad 3.4$$

$$C = \text{Capacitancia} \ 8 \frac{\text{ml } N_2}{\text{g}_{\text{Zeolita}}}$$

$$V_{N_2} = \text{Volumen de nitrógeno}$$

Del volumen de nitrógeno tenemos

$$V_{N_2} = X_{N_2} \times V_T$$

El volumen total

$$V_T = V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}$$

Entonces el volumen del nitrógeno será

$$V_{N_2} = X_{N_2} \times V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}$$

Reemplazando en la ecuación 4

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{mínima}}} = \frac{X_{N_2} \times V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}}{C} \quad 3.5$$

Halando el volumen específico de oxígeno usando 0.1 de la selectividad

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals

$$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}} V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} - (Pb + RT)V_{O_2 \text{ (Selectividad)}}^2 + aV_{O_2 \text{ (Selectividad)}} - ab = 0$$

$V_{O_2 \text{ (Selectividad)}}$  = Volumen específico de oxígeno usando la selectividad

$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}}$  = Presión de oxígeno usando la selectividad

$$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}} = X_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times P_{\text{(Selectividad)}}$$

$X_{O_2}$  (Selectividad) = Concentración de oxígeno 0.1

$P_{(Selectividad)}$  = Presión de trabajo 50 PSI

$$P_{O_2 (Selectividad)} = 0.1 \times 50 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 0.333 \text{ bar}$$

$$P_{O_2 (Selectividad)} = 0.333 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación cúbica de Van der Waals

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{ }^\circ\text{K} \times \text{mol}}$$

$$V_{O_2 (Selectividad)} = 71.686 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Reemplazando en la ecuación 5 tenemos

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{mínima}}} = \frac{X_{N_2 (Selectividad)} \times V_{O_2 (Selectividad)} \times n_{O_2}}{C}$$

$n_{O_2}$  = Número de moles de oxígeno calculado 0.1433 mol

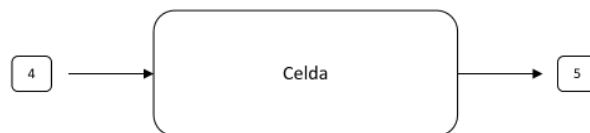
$X_{N_2 (Selectividad)}$  = Fracción de nitrógeno usando en la selectividad 0.9

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{mínima}}} = \frac{0.9 \times 71.686 \frac{\text{l}}{\text{mol}} \times 0.1433 \text{ mol}}{8 \frac{\text{ml N}_2}{\text{g}_{\text{Zeolita}}}} = 2.548 \text{ l}$$

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{mínima}}} = 2.548 \text{ l}$$

Entonces la masa mínima para la obtención de oxígeno para una concentración del 93% de pureza es de 2.548 libras.

Balance de materia de oxígeno en el acumulador tomando en cuenta salida del oxígeno



$$[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$$

[E] = Entrada

[S] = Salida

[P] = Produce

[C] = Consume

[A] = Acumulador

$$[E] - [S] = [A]$$

$$m_{\text{O}_2(4)} - m_{\text{O}_2(5)} = \frac{dm_{\text{O}_2}}{dt}$$

La masa es equivalente

$$m = n \times M$$

$m$  = Masa

$n$  = Número de moles

$M$  = Peso molecular

$$n_{O_2(4)} \times M_{O_2} - n_{O_2(5)} \times M_{O_2} = \frac{d(n_{O_2} \times M_{O_2})}{dt}$$

$$n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)} = \frac{dn_{O_2}}{dt}$$

$$(n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}) \times \int_0^t dt = \int_{n_{O_2(5)}}^{n_{O_2(4)}} dn_{O_2}$$

$$(n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}) \times t = n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}$$

Sabemos

$$n = \frac{V_A}{V}$$

$n$  = Número de moles

$V_A$  = Volumen del acumulador

$V$  = Volumen específico

### Tiempo de llenado del acumulador acumulando y descargando

$$t = \frac{\frac{V_A}{V_{O_2(4)}} - \frac{V_A}{V_{O_2(5)}}}{n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}}$$

$$t = \frac{V_A}{n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}} \times \left( \frac{1}{V_{O_2(4)}} - \frac{1}{V_{O_2(5)}} \right) \quad 3.6$$

Del punto 4 y 5 tenemos los valores

$$V_{O_2(4)} = \text{Volumen específico de oxígeno } 7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$V_{O_2(5)} = \text{Volumen específico de oxígeno } 38.529 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$n_{O_2(4)} = \text{Número de moles de oxígeno } 0.3613 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{O_2(5)} = \text{Número de moles de oxígeno a la salida } 0.2595 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Reemplazando en la ecuación 6 tenemos

$$t = \frac{V_A}{n_{O_2(4)} - n_{O_2(5)}} \times \left( \frac{1}{V_{O_2(4)}} - \frac{1}{V_{O_2(5)}} \right)$$

$$t = \frac{1368.11 \text{cm}^3 \times \frac{1\text{l}}{1000 \text{cm}^3}}{0.3613 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 0.2595 \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \times \left( \frac{1}{7.685 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} - \frac{1}{38.529 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} \right) = 1.4 \text{ min}$$

$$t = 1.4 \text{ min}$$

$$t = 84 \text{ seg}$$

**El tiempo de llenado del acumulador es de 84 segundos tomando en cuenta que acumula y al mismo tiempo descarga**

Volviendo a realizando el balance de materia en la celda

$$[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$$

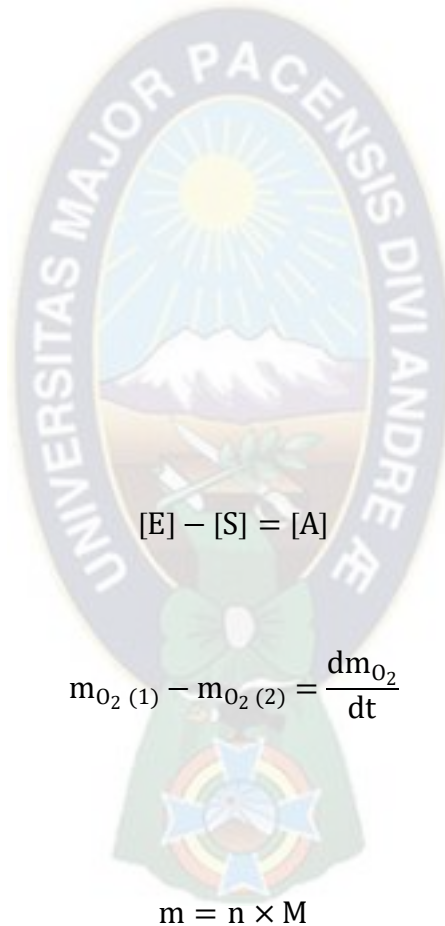
[E] = Entrada

[S] = Salida

[P] = Produce

[C] = Consume

[A] = Acumulador



m = Masa

n = Número de moles

M = Peso molecular

t = Tiempo de llenado del acumulador 1.4 min

$$n_{O_2(1)} \times M_{O_2} - n_{O_2(2)} \times M_{O_2} = \frac{d(n_{O_2} \times M_{O_2})}{dt}$$

$$n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)} = \frac{dn_{O_2}}{dt}$$

$$(n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)}) \int_0^t dt = \int_0^{n_{O_2}} dn_{O_2}$$

$$n_{O_2} = (n_{O_2(1)} - n_{O_2(2)}) \times t$$

Sabiendo

$$n_i = X_i \times n$$

$$n_{O_2} = (n_{O_2(1)} \times n_1 - n_{O_2(2)} \times n_2) \times t \quad 3.7$$

$$n_{O_2} = \left( 0.21 \times 4.1872 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 0.93 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right) \times 1.4 \text{ min} = 0.5085 \text{ mol}$$

$$n_{O_2} = 0.5085 \text{ mol}$$

**Determinación de la masa máxima de zeolita para la obtención de oxígeno concentrado al 93% a una presión de 50 PSI**

$$m_{\text{Zeolita máxima}} = \frac{V_{N_2}}{C} \quad 3.8$$

$$C = \text{Capacitancia} \quad 8 \frac{\text{ml } N_2}{\text{g Zeolita}}$$



$V_{N_2}$  = Volumen de nitrógeno

Del volumen de nitrógeno tenemos

$$V_{N_2} = X_{N_2} \times V_T$$

El volumen total

$$V_T = V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}$$

Entonces el volumen del nitrógeno será

$$V_{N_2} = X_{N_2} \times V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}$$

Reemplazando en la ecuación 4

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{máxima}}} = \frac{X_{N_2} \times V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times n_{O_2}}{C} \quad 3.9$$

Halando el volumen específico de oxígeno usando 0.1 de la selectividad

Partiendo de la ecuación cúbica de Van der Waals

$$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}} V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} - (Pb + RT) V_{O_2 \text{ (Selectividad)}}^2 + a V_{O_2 \text{ (Selectividad)}} - ab = 0$$

$V_{O_2 \text{ (Selectividad)}}$  = Volumen específico de oxígeno usando la selectividad

$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}}$  = Presión de oxígeno usando la selectividad

$$P_{O_2 \text{ (Selectividad)}} = X_{O_2 \text{ (Selectividad)}} \times P_{\text{(Selectividad)}}$$

$X_{O_2}$  (Selectividad) = Concentración de oxígeno 0.1

$P_{(Selectividad)}$  = Presión de trabajo 50 PSI

$$P_{O_2} (Selectividad) = 0.1 \times 50 \text{ PSI} \times \frac{1 \text{ bar}}{15 \text{ PSI}} = 0.333 \text{ bar}$$

$$P_{O_2} (Selectividad) = 0.333 \text{ bar}$$

Reemplazando en la ecuación cúbica de Van der Waals

$$a = 1.378 \text{ bar} \frac{\text{l}^2}{\text{mol}}$$

$$b = 0.03183 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R = 0.083 \frac{\text{bar} \times \text{l}}{\text{ }^\circ\text{K} \times \text{mol}}$$

$$V_{O_2} (Selectividad) = 71.686 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Reemplazando en la ecuación 5 tenemos

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{máxima}}} = \frac{X_{N_2} (Selectividad) \times V_{O_2} (Selectividad) \times n_{O_2}}{C}$$

$n_{O_2}$  = Número de moles de oxígeno calculado 0.5085 mol

$X_{N_2}$  (Selectividad) = Fracción de nitrógeno usando en la selectividad 0.9

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{máxima}}} = \frac{0.9 \times 71.686 \frac{\text{l}}{\text{mol}} \times 0.5085 \text{ mol}}{8 \frac{\text{ml } N_2}{\text{g}_{\text{Zeolita}}}} = 9.04 \text{ l}$$

$$m_{\text{Zeolita}_{\text{máxima}}} = 9.04 \text{ l}$$

Entonces la masa máxima para la obtención de oxígeno para una concentración del 93% de pureza es de 9.04 libras.

Entonces

$$2.548 \text{ libras} \leq \text{masa}_{\text{Zeolita}} \leq 9.04 \text{ libras}$$

**Determinando el tiempo de saturación de la celda**

$$T_{\text{Saturación}} = \frac{n_{\text{O}_2}}{X_{\text{O}_2(1)} \times n_1 - X_{\text{O}_2(2)} \times n_2} \quad 3.10$$

Hallando los numero de moles de oxígeno

$$n_{\text{O}_2} = \frac{\text{masa}_{\text{Zeolita}} \times C}{X_{\text{N}_2 \text{ Selectividad}} \times V_{\text{O}_2 \text{ (Selectividad)}}$$

**Utilizando 3 libras**

$$n_{\text{O}_2} = \frac{3 \text{ l} \times \frac{453.6 \text{ g}_{\text{Zeolita}}}{1 \text{ l}} \times \frac{8 \text{ ml N}_2}{\text{g}_{\text{Zeolita}}} \times \frac{1 \text{ l N}_2}{1000 \text{ ml N}_2}}{0.9 \times 71.686 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} = 0.1687 \text{ mol}$$

$$n_{\text{O}_2} = 0.1687 \text{ mol}$$

Reemplazando en la ecuación 10 tenemos

$$T_{\text{Saturación}} = \frac{0.1687 \text{ mol}}{0.21 \times 4.1872 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 0.93 \times 0.5549 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}}} = 27.865 \text{ seg}$$

$$T_{\text{Saturación}} = 27.865 \text{ seg}$$

**Calculando el volumen de la celda del adsorbente con 3 libras de zeolita**

Sabemos

$$\text{Volumen}_{\text{Zeolita}} = \frac{\text{masa}_{\text{Zeolita}}}{\text{densidad}_{\text{Zeolita}}} \quad 3.11$$

De la densidad tenemos

$$0.62 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \times \frac{1 \text{ lb}}{453.592 \text{ g}} \times \frac{28316.8 \text{ ml}}{1 \text{ pie}^3} = 38.705 \text{ lb/pie}^3$$

Entonces

$$\text{Volumen}_{\text{Zeolita}} = \frac{3 \text{ lb}}{38.705 \text{ lb/pie}^3}$$

$$\text{Volumen}_{\text{Zeolita}} = 0.07751 \text{ pie}^3 = 2194.84 \text{ cm}^3$$

Por medio de la masa de zeolita 13X HP se realiza el dimensionamiento de las celdas o recipientes contenedoras de zeolita dándonos un resultado de  $2194.84 \text{ cm}^3$ , este volumen se divide entre dos por el motivo que son dos celdas iguales de tamaño y volumen, entonces cada celda de zeolita 13X HP tendrá un volumen  $1097.42 \text{ cm}^3$ .

Una vez teniendo el volumen de cada recipiente y dando el radio de un cilindro en centímetros

Volumen de cada recipiente =  $1097.42 \text{ cm}^3$

$$\text{Altura} = \frac{\text{volumen}}{\pi \times r^2} \quad 3.12$$

Teniendo un cilindro de 3 pulgadas de diámetro convirtiéndolo a centímetros

$$3 \text{ pulg.} \times \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulgada}} = 7.62 \text{ cm de diametro}$$

$$\text{radio} = \frac{\text{diametro}}{2} = \frac{7.62}{2} = 3.81 \text{ cm}$$

Reemplazando en la ecuación de la altura tenemos:

$$\text{Altura} = \frac{1097.42 \text{ cm}^3}{\pi \times (3.81 \text{ cm})^2} = 24.06428 \text{ cm}$$

Tabla 7. *Altura de la celda según diámetro de un cilindro*

Diametro (pulgada)	Altura (cm)
1	209
1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	93
2	52
2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	33
3	23
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	17
4	13

Fuente. *Diseño de un generador de oxígeno para su aplicación en piscicultura*

Figura 17. Diseño de la celda de zeolita

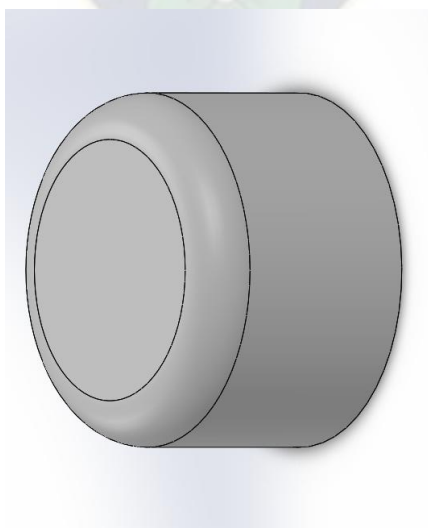


Fuente. Elaboración propia

Nota. Dimensionamiento de la celda de zeolita

En el diseño de las celdas se utilizará tubos PVC (clase 9 para la celda y esquema 40 para la tapa) de 3 pulgadas de diámetro con una altura de 23 cm y con espesores de 3.5 milímetros para la tubería de la celda y de 5.82 milímetros para la tapa de la celda. El sistema electrónico, mini compresor y las celdas de zeolita 13X HP, sistema neumático, sistema de control definirán el diseño del concentrador portátil de oxígeno.

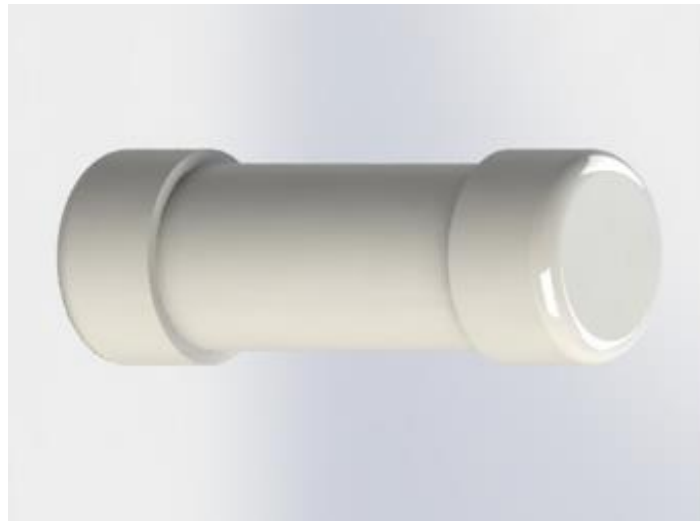
Figura 18. Diseño de la tapa de zeolita



Fuente. Elaboración propia

Nota. Dimensionamiento de la tapa de la celda de zeolita

Figura 19. Vista de la celda de zeolita

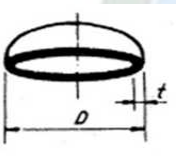
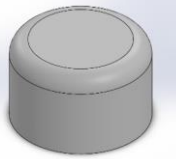

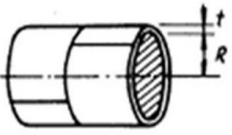



Fuente. Elaboración propia

### 3.2.1.1.1 Cálculo de la presión de la celda de zeolita

Las fórmulas para el cálculo de la presión interna máxima la cual puede soportar cada recipiente según Eugene F. Megyesy del Manual de Recipientes a Presión diseño y cálculo son:

Tabla 8. Fórmulas de la presión interna máxima

Fórmula	Forma	Diseño	Diseño final	
Tapa Elipsoidal				
$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$				
Cilindro				
$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$				

Fuente. Diseño propio

Donde

<i>S</i>	Valor esfuerzo en $lb/pulg^2$	<i>P</i>	Presión de diseño en $lb/pulg^2$
<i>D</i>	Diámetro interior en pulg.	<i>E</i>	0.85 eficiencia de las juntas del casco y de la cabeza
<i>R</i>	Radio interior en pulg.	<i>t</i>	Espesor de pared en pulg.

Utilizando un tubo de PVC clase 9 y tapa esquema 40 con espesores previamente establecidos de 3.5 mm para las celdas y las tapas de 5.82 mm los cuales soportaran presiones elevadas, para cada celda de zeolita 13X HP se obtuvieron los siguientes datos que determinan su límite de presión máxima que puede soportar evitando de esta manera accidentes.

Teniendo en consideración que los espesores son:

$$t_{celda} = 3.5mm = 0.137795 \text{ pulg.}$$

$$t_{tapa} = 5.82mm = 0.2291339 \text{ pulg.}$$

Tabla 9. Propiedades para cada celda y tapa de zeolita

Tubería PVC Clase 9		Tubería PVC Esquema 40 tapa	
D	3 pulg.	D	3 pulg.
R	1.5 pulg.	R	1.5 pulg.
E	0.85 para cilindro de juntas sin uniones	E	0.85 para cilindro de juntas sin uniones
S	$1096.5 \text{ lb/pulg}^2$	S	$1096.5 \text{ lb/pulg}^2$
$t_{celda}$	$0.137795 \text{ pulg}$	$t_{tapa}$	$0.2291339 \text{ pulg}$

Fuente. Elaboración propia

Presión máxima de la celda

$$P = \frac{SEt}{R+0.6t} \quad 3.13$$



$$P_{celda} = \frac{1096.5 \text{ lb/pulg}^2 \times 0.85 \times 0.137795 \text{ pulg}}{1.5 \text{ pulg} + 0.6 \times 0.137795 \text{ pulg}} = \frac{128.4283849}{1.582677}$$

$$P_{celda} = 81.14630142 \text{ PSI}$$

Presión máxima de las tapas elipsoidales

$$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t} \quad 3.14$$

$$P_{Tapa \text{ Elipsoidal}} = \frac{2 \times 1069.5 \text{ lb/pulg}^2 \times 0.85 \times 0.2291339 \text{ pulg}}{3 \text{ pulg} + 0.2 \times 0.2291339 \text{ pulg}}$$

$$P_{Tapa \text{ Elipsoidal}} = \frac{416.5998003}{3.04582678} = 136.7772465 \text{ PSI}$$

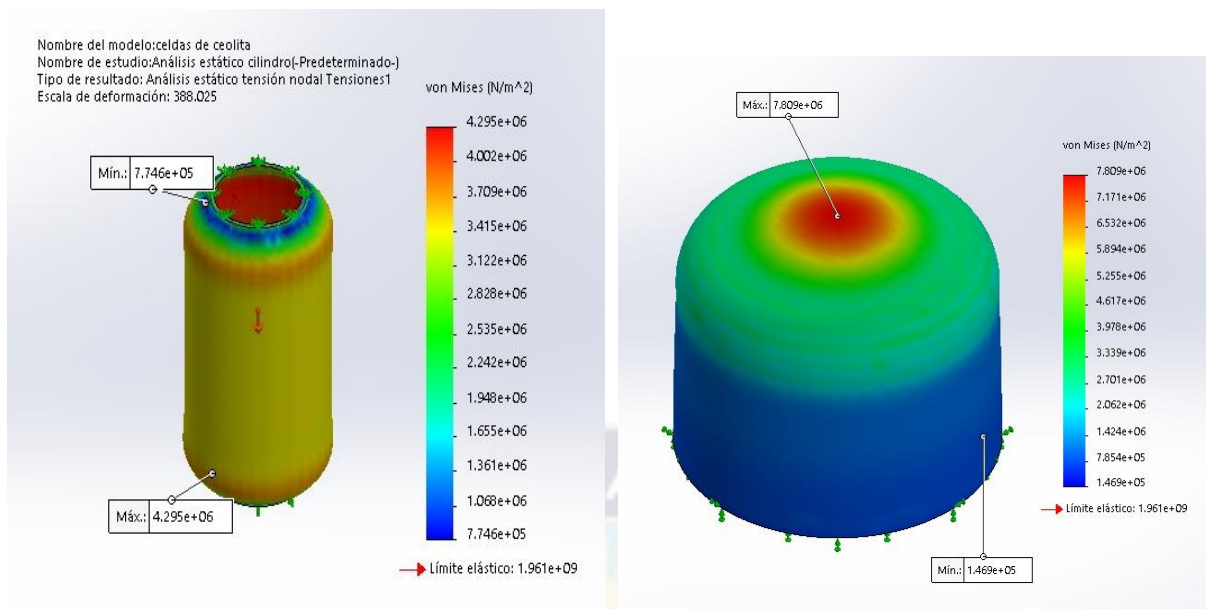
Cada celda de zeolita 13X HP soportará aproximadamente una presión de 80 PSI aproximadamente.

### 3.2.1.1.2 Factor de seguridad

El factor de seguridad puede considerarse como una medida de la incertidumbre en el diseño de los modelos analíticos, en teoría de falla y en datos de las propiedades del material manejado. Este factor siempre será mayor a uno y nos indicará que tanta confianza y exactitud es la que se emplea en los cálculos (análisis y desarrollo de un programa de selección rápida de factores de seguridad para diseño de elementos mecánicos) Luis Carlos Rios Q, Eduardo Rocancio H.

$$f_s = \frac{P_{maxima}}{P_{trabajo}} = \frac{80 \text{ PSI}}{50 \text{ PSI}} = 1.6 \text{ veces superior a su valor mínimo}$$

Figura 20. Modelo del diseño de la tapa y de la celda de zeolita en SolidWorks



Fuente. Elaboración propia

Nota. Este cuadro muestra los esfuerzos y deformaciones obtenidos por el programa SolidWorks

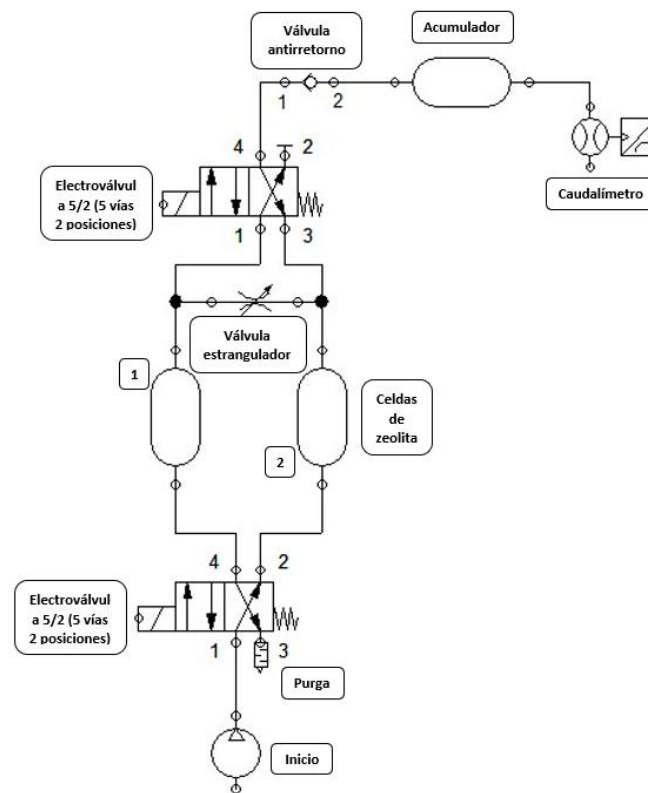
### 3.2.2 Sistema eléctrico y neumático

#### 3.2.2.1 Circuito neumático

El sistema neumático transmite potencia a un dispositivo a través del uso de un gas utilizando FESTO Fluid Sim, desarrollando de esta manera el flujo de oxígeno de nuestro sistema con electroválvulas solenoides 5/2 (5 vías 2 posiciones) los cuales representarán al controlador (placa de Arduino Uno), cuando se enciende el concentrador portátil de oxígeno (condiciones ideales de funcionamiento) se activa el compresor al mismo tiempo que las electroválvulas solenoides 5/2 (5 vías 2 posiciones) V1 y V2 se encuentran en su posición 1 (P1) dando inicio de esta manera al ciclo 1, el compresor suministra aire del medio ambiente directo a un filtro el cual libera de partículas y humedad dejando pasar a la electroválvula solenoide V1 que se encuentra en la posición 1 P1 dando paso del aire directo a la celda de zeolita 1 en la cual la zeolita se encarga de retener al nitrógeno y los demás compuestos del aire dejando pasar solo el oxígeno que se dirige a la electroválvula V2 la cual también se

encuentra en la posición 1 P1 al mismo tiempo pasa por una válvula antirretorno o válvula unidireccional el cual se encarga de no dejar pasar el fluido de regreso a la electroválvula V2 y de esta manera el oxígeno llega al acumulador.

Figura 21. Esquema del sistema neumático

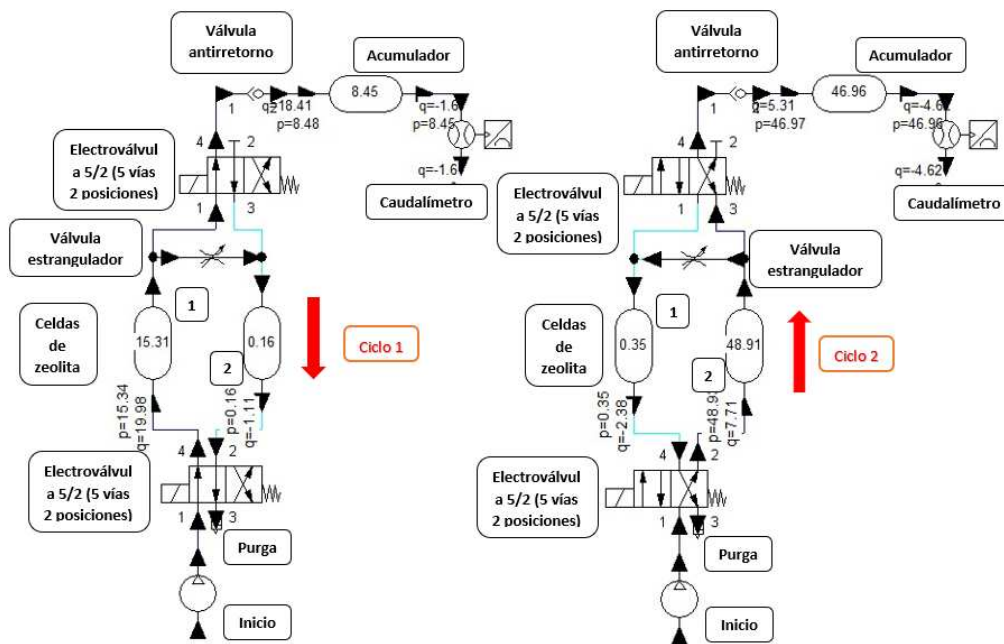


Fuente. Elaboración propia

Nota. Las electroválvulas al acabar su ciclo de 1 minuto tienen un retorno por muelle

Pasado el tiempo de 1 minuto termina el ciclo 1 las electroválvulas solenoides V1 y V2 pasan a la posición 2 P2 mediante un retorno por muelle, el compresor suministra el aire que pasa por un filtro que se encarga de liberar partículas y humedad para dirigirse a la electroválvula solenoide V1 que se encuentra en la posición 2 P2, el aire se dirige a la celda de zeolita 2 en la cual la zeolita deja pasar el oxígeno y se encarga de retener el nitrógeno y los demás compuestos del aire, el oxígeno se dirige a la electroválvula V2 que se encuentra en la posición 2 P2 la cual deja pasar el gas al acumulador, antes de llegar al acumulador entre la electroválvula V2 y el acumulador se encuentra una válvula antirretorno.

Figura 22. Esquema de los ciclos del sistema neumático



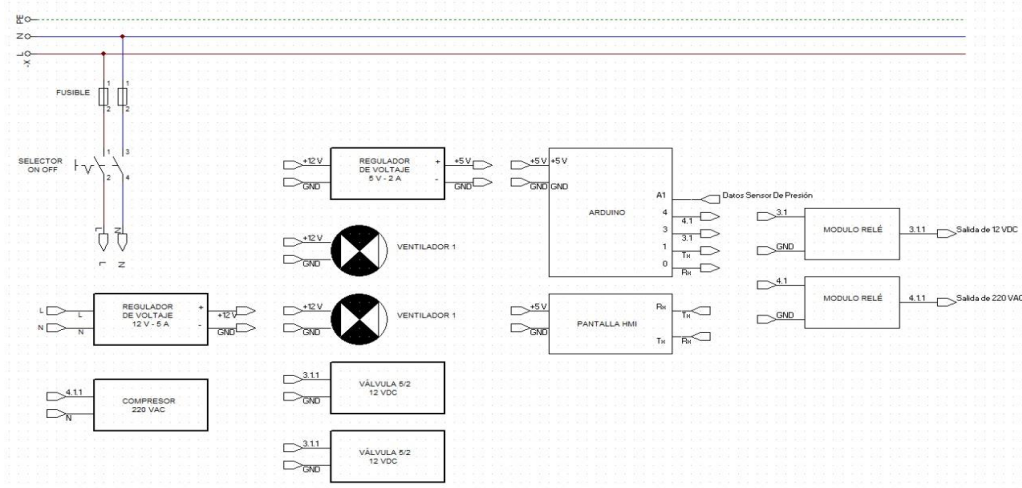
Fuente. Elaboración propia

Cabe mencionar que cuando sale el oxígeno de las celdas de zeolita 1 y 2 antes de llegar a la electroválvula V2 se encuentra un conector que conecta la celda 1 y la celda 2 de zeolita en medio de este conector se encuentra una válvula estranguladora que se encarga de reducir la velocidad del caudal, este conector es usado para la desorción de ambas celdas de zeolita ya que parte del oxígeno que sale de cada celda pasa por el conducto conector para liberar la celda que no se encuentra trabajando produciendo de esta manera la etapa de desorción del nitrógeno y los demás compuestos del aire los cuales son eliminados mediante la purga de la electroválvula V1.

### 3.2.2.2 Circuito eléctrico

El circuito eléctrico es el conjunto de componentes unidos adecuadamente las cuales se encargan de transportar corriente por todo el sistema.

Figura 23. Esquema del sistema eléctrico

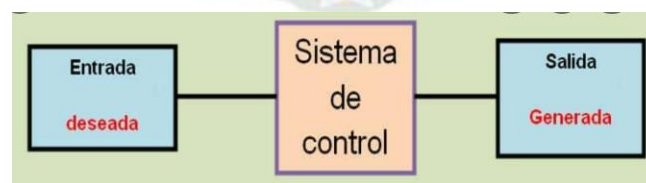


Fuente. Elaboración propia

### 3.2.3 Sistema de control

Un sistema de control es el encargado de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados, tienen la finalidad de conseguir mediante variables de control un dominio sobre las variables de salida y de esta manera alcanzar unos valores determinados garantizando la estabilidad frente a perturbaciones (señal que afectan el valor de salida) y errores en el modelo, de fácil implementación logrando ser eficiente (capacidad de cumplir adecuadamente su función).

Figura 24. Esquema de un sistema de control



Fuente. Sistema de control definición tipos y función

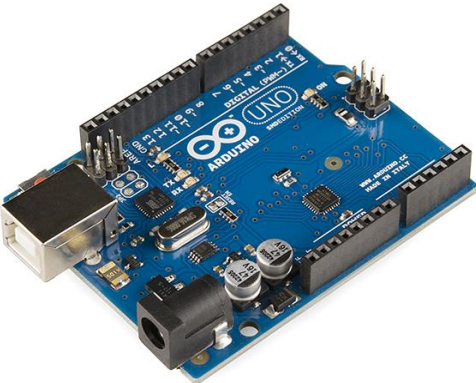
El control se realiza mediante una placa de Arduino Uno el cual tiene la capacidad de almacenamiento y al mismo tiempo procede con la ejecución del código de programación realizada, básicamente se encuentra compuesta de un

microcontrolador (ATmega 328) con una configuración de sistema mínimo (usa componentes indispensables para el controlador), con un interfaz USB tipo B el cual permite una reprogramación del microcontrolador utilizando un ordenador, cable USB, software Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) y un grupo de cabezales que nos permiten conectar los pines tanto de entrada como de salida.

La placa de Arduino Uno se encuentra equipada con un conjunto de pines de entradas y salidas digitales y analógicas, contiene 14 pines digitales y 6 pines analógicos programables, puede ser alimentado mediante el cable USB o por una batería de 9 voltios externa, aunque también acepta voltajes de entre 7 voltios y 20 voltios.

Tabla 10. Características técnicas del Arduino Uno

Arduino Uno	
Microcontrolador	Atmega 328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7 a 20 V
Pines digitales	14
Pines analógicos	6
Memoria SRAM	2 Kb
Memoria EEPROM	1 Kb
Memoria FLASH	32 Kb
Corriente DC por PIN entrada y salida	20 mA
Corriente CC PIN de 3.3 V	50 mA
Longitud	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g



Fuente. Elaboración propia

*Nota. La placa de Arduino Uno posee características técnicas las cuales sirven de gran manera al momento de utilizar dicho controlador*

Para conseguir los objetivos de un sistema de control ideal el sistema funciona con dos señales enviadas por el controlador placa Arduino Uno muy sencillo y de fácil comprensión utiliza la entrada 0 y 1 para controlar la pantalla Nextion (HMI), la entrada 3 controla el ciclo de funcionamiento de las electroválvulas, la entrada 4 controla al compresor, la entrada A1 controla al sensor de presión.

- Recepción de la señal o pulso de 1 minuto el cual puede ser regulable desde la pantalla nextion.
- La electroválvula V1 5/2 se encuentran en la posición 1 P1 abiertas dejando pasar aire a través de la celda de zeolita 1 en el cual separa el oxígeno de los demás compuestos del aire dejando pasar directamente el oxígeno a la electroválvula V2 5/2 que también se encuentra en la posición 1 P1 para luego dirigirse al acumulador.
- Comienza el nuevo ciclo después de 1 minuto.
- Las electroválvulas intercambian de posición a la posición 2 P2 dando inicio al nuevo ciclo mediante un retorno por muelle que también se encuentra programado mediante un pulso de 1 minuto.

Esta fase se alimentará de una fuente de 12 voltios la cual alimentará a las electroválvulas, ventiladores, al mismo tiempo alimentará al controlador placa de Arduino Uno el cual se encontrará protegido mediante una placa electrónica (da diferentes voltajes antes de llegar al controlador placa de Arduino Uno), la placa de Arduino uno controla al mismo tiempo las electroválvulas y los sensores de presión.

### 3.3 Análisis previo al diseño

Tabla 11. Peso de las partes del concentrador de oxígeno medicinal

Componentes	Peso Aproximado Kg
Mini compresor	2.5
Ventilador	1.8
Electroválvula 5/2	1.88
Válvula antiretorno y estrangulador	1.4
Regulador, flujometro, humidificador	0.91
Regulador de presión	0.5
Mangueras	0.3
Arduino uno	0.025
Display	0.283495
Fuente de 12 V	8
Componentes electrónicos	0.055
Zeolita 13X HP	1.36078
Celdas de zeolita	2.96
Peso total	21.974275
<b>Peso total en Newton</b>	<b>215.347895</b>

Fuente. Elaboración propia

Carga muerta del dispositivo CM

Sabiendo:

$$1 \text{ Kg} = 9.8 \text{ N}$$

$$CM = \frac{21.974275 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ N}}{1 \text{ Kg}} = 215.35 \text{ N}$$

$$CM = 0.215 \text{ KN}$$

El concentrador portátil de oxígeno medicinal deberá incorporar filtros de partículas gruesas para evitar que penetren en la caja el polvo y la suciedad.

### 3.4 Diseño de elementos

El diseño del concentrador portátil de oxígeno medicinal se contempla en la ciudad de La Paz con un proceso por Adsorción por Oscilación de Presión PSA el cual es un dispositivo médico para personas con problemas respiratorios (oxigenoterapia), y consta de las siguientes características:

- 2 celdas de zeolita de 23 cm de altura y 3 pulgadas de diámetro.
- 1 acumulador de 23 cm de altura y 3 pulgadas de diámetro.
- En la parte del soporte lleva 4 ruedas para su fácil desplazamiento.
- El sistema neumático consta de un ciclo de 3 minutos para cambiar de fase o ciclo.
- El sistema de control se encarga de controlar las electroválvulas.
- La caja puede soportar un peso de 65 Kg de sus componentes.
- Lleva una adsorbente zeolita 13X HP.
- Celdas de zeolita y acumulador de oxígeno.



Tabla 12. Detalle del tubo PVC clase 9

Descripción	Características	
Material	Tubo PVC clase 9	
Cantidad	1	
Diámetro	3	pulgadas
Espesor	3.5	mm
Resistencia a la flexión	1021	$KG/cm^2$
Resistencia a la tracción	520	$KG/cm^2$
Resistencia a la compresión	700	$KG/cm^2$
Módulo de elasticidad	20000	$KG/cm^2$

Fuente. Elaboración propia

Tabla 13. Detalle de la tapa PVC esquema 40

Descripción	Características	
Material	Tapa PVC esquema 40	
Cantidad	6	
Diámetro	3	pulgadas
Espesor	5.82	mm
Resistencia a la flexión	1021	$KG/cm^2$
Resistencia a la tracción	520	$KG/cm^2$
Resistencia a la compresión	700	$KG/cm^2$
Módulo de elasticidad	20000	$KG/cm^2$

Fuente. Elaboración propia

Figura 25. Diseño del concentrador portátil de oxígeno



Fuente. Elaboración propia

Cabe destacar que este concentrador portátil de oxígeno proporcionará un caudal regulable de 1 a 10 litros/minuto de oxígeno medicinal y una elevada pureza para ser utilizado en pacientes con problemas respiratorios los cuales pueden encontrarse en su hogar o en recintos hospitalarios.

### 3.5 Especificación de componentes

Para obtener diferentes soluciones se ordena las funciones de los componentes del concentrador portátil de oxígeno medicinal los cuales se pueden expresar de la siguiente manera.

Tabla 14. Especificación de componentes

N°	Descripción	Cantidad
1	Cierra de corte	2
2	Broca	1
3	Lija	1
4	Teflon	4
5	Tarraja	1
6	Pegamento	2

Fuente. Elaboración propia

### 3.6 Resumen de memoria de cálculo

Las tablas correspondientes a la memoria de cálculo se explican con detalle a continuación donde queda plasmado de acuerdo a sus respectivos sistemas y subsistemas designando su respectiva codificación de cada elemento para una mejor referencia.

WW – XX – YY – ZZ

Donde:

WW = Plano (PL) o Isométrico (IM)

XX = Sistema

YY = Subsistema

ZZ = Número de pieza

Del mismo modo adoptando una codificación para una mejor referencia de los planos

N - ##

Donde:

## = Número asignado a cada pieza

#### Sistema mecánico

Tabla 15. Detalle de la memoria de cálculo sistema mecánico

N°	Descripción	Código	N° de plano	Material	Cantidad	Dimensiones en mm	Observaciones
1	Celda de zeolita	N-01	PL-SM-01	PVC clase 9	2	D=76.2, L=230, e=3.5	Calculado
2	Acumulador	N-02	PL-SM-02	PVC clase 9	1	D=76.2, L=230, e=3.6	Calculado
3	Tapa	N-03	PL-SM-03	PVC Esquema 40	6	D=76.2, L= , e=5.49	Calculado
4	Minicompresor	N-04		Varios	1		Especificado

Fuente. Elaboración propia

## Sistema neumático

Tabla 16. Detalle de la memoria de cálculo sistema neumático

Número	Descripción	Código	N° de plano	Cantidad	Observaciones	Función
5	Sistema Neumático	N-05	PL-SN-05	1	Diseñado	Función del sistema neumático

Fuente. Diseño propio

Tabla 17. Resumen de los componentes de los sistemas

Código	Función	Código	Función
S0	Buje		Rele de 12 V dc
S1	Filtro de aire		Fuente de 12 V
S2	Celda de zeolita		Arduino Uno
S3	Acumulador		Ventilador
S4	Electroválvula 5/2		
S5	Presostato		
S6	Válvula antirretorno		
S7	Válvula estranguladora		
S8	Zeolita 13X HP		
S9	Compresor		

Fuente. Elaboración propia

### 3.7 Balance de materiales

En cada la tabla presentada a continuación se realiza un balance de materiales donde se describen datos específicos de cada componente utilizado, los cuales están representando detalladamente a los respectivos sistemas previamente definidos en el diseño del concentrador portátil de oxígeno medicinal para rehabilitar a pacientes con problemas respiratorios, conociendo previamente algunas variables podemos definir las dimensiones del dispositivo.

Tabla 18. Balance de materiales

N°	Descripción	Código	N° de plano	Material	Cantidad	Peso neto Kg	Peso total Kg	Peso Bruto Kg	Peso bruto total Kg
1	Celda de zeolita	N-.01	PL-SM-01	PVC clase 9	2	2.96	5.92	11.84	23.68
2	Acumulador	N-.02	PL-SM-02	PVC clase 9	1	2.96	2.96	2.96	2.96
3	Tapa	N-.03	PL-SM-03	PVC Esquema 40	6	1.14	1.14	1.14	1.14
4	Minicompresor	N-.04		Varios	1	2.5	2.5	2.5	2.5
5	Sistema neumático	N-.05	PL-SN-04	Varios	1	3.6	3.6	3.6	3.6
6	Electroválvulas 5/2	N-.06		Varios	3	1.88	1.88	1.88	1.88
7	Humidificador, regulador y flujometro	N-.07		Varios		0.91	0.91	0.91	0.91
8	regulador de presión	N-.08		Varios		0.23	0.23	0.23	0.23
9	Zeolita	N-.09		13X HP Sieve Molecular	3 Lb	1.4	1.4	1.4	1.4
10	Válvula antirretorno	N-.10		Varios	1	0.7	0.7	0.7	0.7
11	Válvula estranguladora	N-.11		Varios	1	0.7	0.7	0.7	0.7
12	Tubos conectores	N-.12		Varios		1	1	1	1
13	Filtro regulador de aire	N-.13		Varios	1	0.2	0.2	0.2	0.2
14	Arduino Uno	N-.14		Varios	1	0.025	0.025	0.025	0.025
15	Fuente de 12 V	N-.15		Varios	1	0.6	0.6	0.6	0.6
16	Conector en T	N-.16		Varios		0.2	0.2	0.2	0.2
17	Relé	N-.17		Varios	1	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034
18	Conectores rapido	N-.18		Varios	1	0.3	0.3	0.3	0.3
19	Cable eléctrico	N-.19		Varios	1	0.5	0.5	0.5	0.5

Fuente. Elaboración propia

### 3.8 Planos de conjunto y despiece

La presentación de cada uno de los planos los cuales fueron realizados con la colaboración de paquetes informáticos de simulación tales como el SolidWorks, Proteus, Festo Fluid Sim cada uno de los planos corresponde a los diferentes sistemas que conforman al diseño del concentrador portátil de oxígeno los cuales se encuentran en los anexos.

Tabla 19. Balance de materiales

N°	Descripción	N° de plano
1	Celda de zeolita	PL-SM-01
2	Acumulador	PL-SM-02
3	Tapa	PL-SM-03
4	Sistema Neumático	PL-SN-04
5	Sistema de control Proteus	PL-SC-05

Fuente. Elaboración propia

## CAPÍTULO IV

### 4 Simulación del proceso

#### 4.1 Simulador Proteus

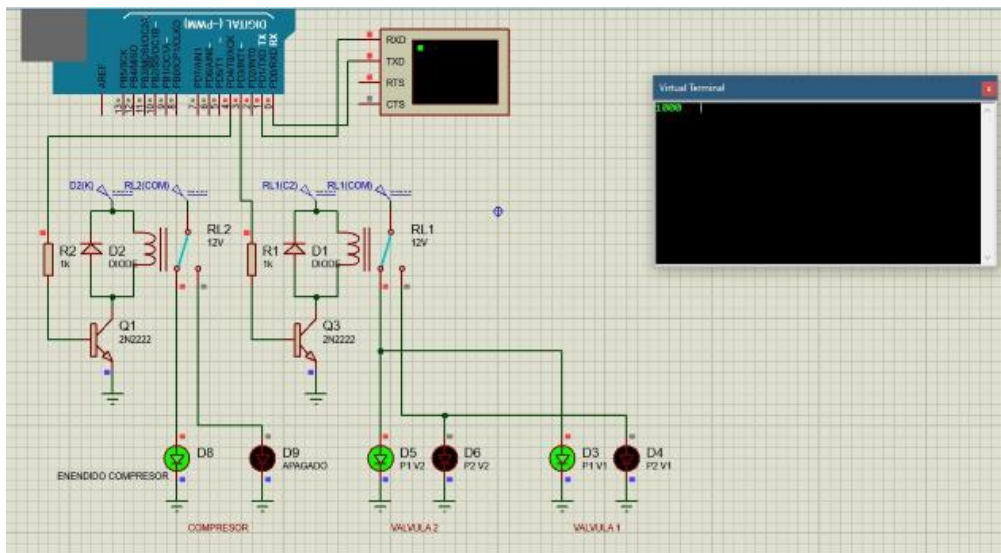
El simulador Proteus es un sistema completo de diseño electrónico en la ejecución de proyectos de equipos electrónicos en todas sus etapas combinando un avanzado programa de captura de esquemas electrónicos, sistema de simulación mixto (analógico y digital), programación del software, depuración de errores, documentación y construcción

La razón primordial por la cual se escogió este simulador fue por la capacidad de simular circuitos basados en controladores, componentes electrónicos que acompañan el diseño (LEDs, chips, display LCD, etc) en tiempo real y de forma interactiva.

#### 4.2 Procedimiento del diseño general

Las características en el diseño del concentrador portátil de oxígeno medicinal para oxigenoterapia propuestos para el estudio de este proyecto de grado utilizando Arduino Uno como sistema de control el cual controla el encendido del mini compresor de aire y las electroválvulas solenoides 5/2 (5 vías 2 posiciones) las cuales se encuentran controladas mediante una señal digital por el microcontrolador, para la cual se utilizó como simulador el PROTEUS el cual se encarga de ajustar los parámetros operativos durante la simulación, la placa Arduino Uno abre simultáneamente las dos electroválvulas y el mini compresor liberando de esta manera el caudal de aire además de controlar el tiempo de cada ciclo de adsorción (3 minutos) el cual puede regularse al tiempo que sea necesario mediante el display nextion de 2.8 pulgadas (conexión HMI).

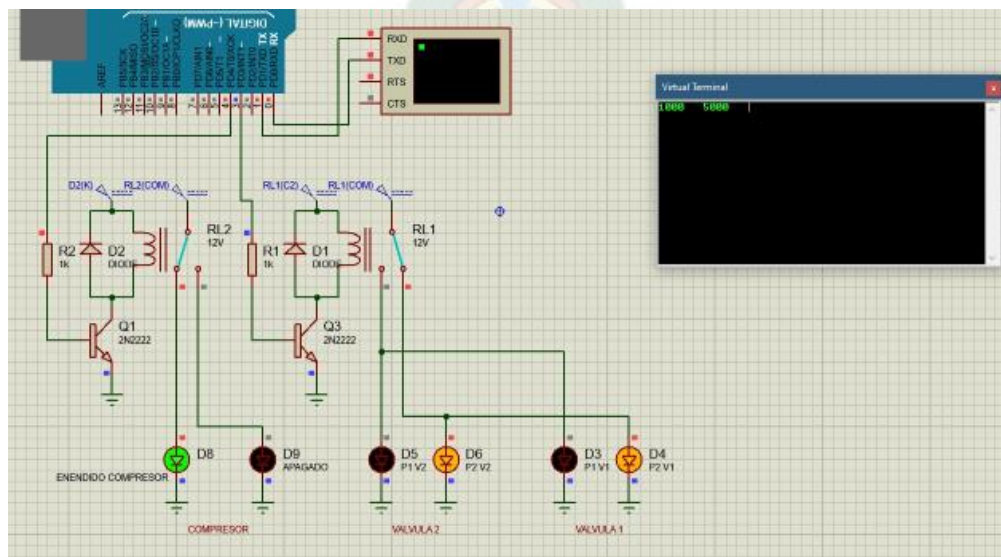
Figura 26. Diseño realizado en Proteus



Fuente. Diseño propio

El relé funciona como un interruptor permitiendo el paso de corriente, el diodo lo utilizamos como protección ante la vuelta de corriente de tal modo que absorba los picos de tensión, el transistor se encarga de entregar una señal de salida cuando le envían una señal de entrada deja pasar la corriente cada que le llegue una señal del Arduino, la resistencia evita que el transistor pueda activar en modo errático el relé es la medida de oponerse al flujo de corriente.

Figura 27. Diseño realizado en Proteus



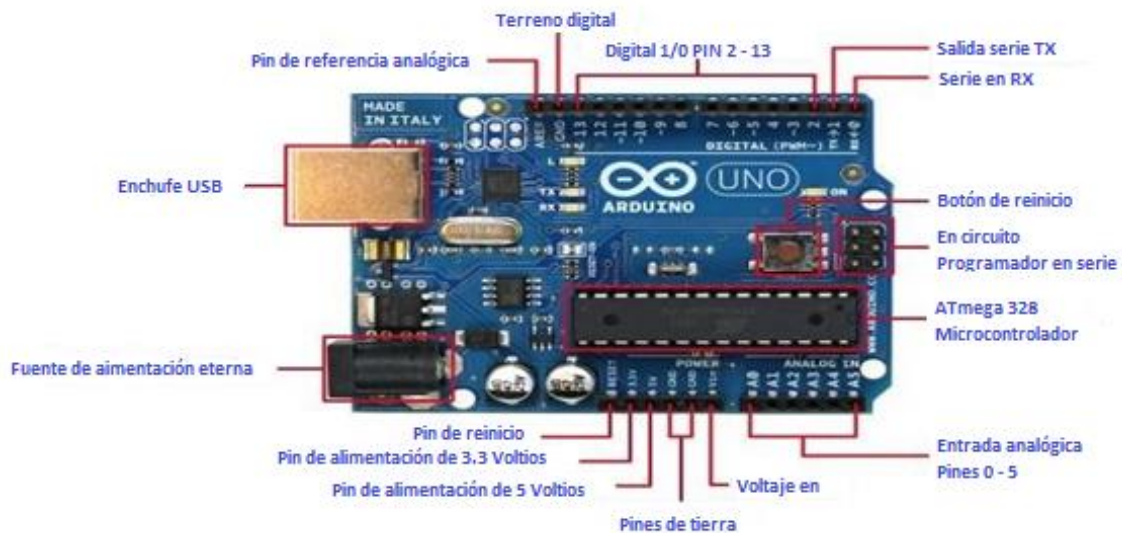
Fuente. Elaboración propia

El relé, la resistencia, el transistor y el diodo conforman el circuito de protección de la placa Arduino Uno ya que este microcontrolador trabaja con una corriente de 5 Voltios, la señal que envía la placa de Arduino Uno al transistor acciona el relé el cual deja pasar la tensión con la cual trabaja el compresor y las electroválvulas

#### 4.3 Simulación del Arduino Uno

Siendo una pequeña computadora en el cual se puede programar para leer información y enviar comandos desde una computadora a la placa Arduino logrando desarrollar el programa en el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) el cual permite al desarrollador de códigos del Arduino realizar el rastreo de códigos, la simulación en Arduino proporciona una poderosa herramienta con el cual probamos y depuramos los códigos desarrollados antes de construir el prototipo obteniendo de esta manera una calidad de codificación y corrección de la funcionalidad del código.

Figura 28. Arduino Uno



Fuente. Elaboración propia

Utilizando el código abierto llamado Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) explicando las principales funciones del código:



Contamos con 2 electroválvulas solenoides V1 y V2 los cuales son 5/2 (5 vías 2 posiciones), cuando la bobina de la electroválvula se energiza permite que el aire fluya a través de la posición 1 (P1) de la electroválvula V1 al mismo tiempo la electroválvula V2 también se encuentra en la posición 1 (P1), el puerto 3 es la salida de las electroválvulas, el puerto 4 es el arranque del compresor el cual se utilizará para comprimir el aire atmosférico que se suministra al filtro de línea eliminando contaminantes y la humedad del aire, los puertos 0 y 1 son utilizadas por el HMI (Interfaz Hombre Máquina), el puerto A1 es utilizado como entrada del sensor de presión analógico

Pasado el tiempo de ciclo de 3 minutos las electroválvulas 5/2 (5 vías 2 posiciones) V1 y V2 cambian de posición a la posición 2 (P2) mediante un retorno por muelle, cabe mencionar que el tiempo de ciclo de 3 minutos puede ser regulable desde el display Nextion.

### **Código en Arduino del sistema de control**

```

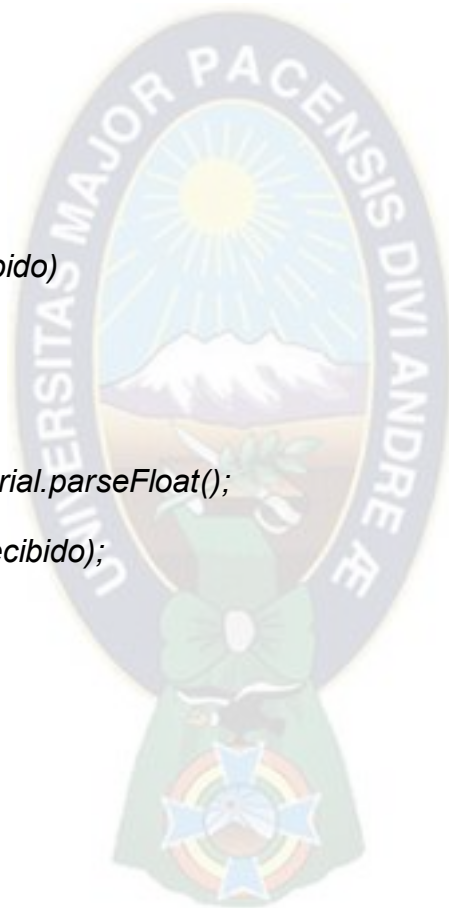
long tiempoRecibido = 0;
bool nuevoDato,EstadoSensor = false;
char comandoRecibido;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //comunicación serial
  pinMode(4,OUTPUT); //salida para compresor
  pinMode(3,OUTPUT); //salida para electrovalvula 1 y 2
}

void loop()
{
  SetearValor(); //para cambiar el valor de interaccion entre posiciones de las válvulas
  VerSensor(); //para arrancar el programa

```

```
}  
  
void SetearValor()  
{  
  if (Serial.available() > 0)  
  {  
    comandoRecibido = Serial.read();  
    nuevoDato = true;  
    if (nuevoDato == true)  
    {  
      switch (comandoRecibido)  
      {  
        case 'A':  
          tiempoRecibido = Serial.parseFloat();  
          Serial.print(tiempoRecibido);  
          Serial.write(0XFF);  
          Serial.write(0XFF);  
          Serial.write(0XFF);  
          break;  
  
        // case 'B'  
        // Serial.println("Encender Compresor");  
        // Serial.write(0XFF);  
        // Serial.write(0XFF);  
        // Serial.write(0XFF);  
        // break;
```



```
    }  
  }  
  nuevoDato = false;  
}  
}  
  
void VerSensor()  
{  
  CorrerPrograma();  
  EncenderCompresor();  
}  
  
void EncenderCompresor()  
{  
  digitalWrite (4,HIGH);  
}  
  
void CorrerPrograma()  
{  
  digitalWrite (2,HIGH);  
  digitalWrite (3,HIGH);  
  delay(tiempoRecibido);  
  digitalWrite (2,LOW);  
  digitalWrite (3,LOW);  
  delay(tiempoRecibido);  
}
```



El microcontrolador se programa mediante el lenguaje propio de la Placa de Arduino Uno basado en el lenguaje de programación similar al C++ el cual posteriormente el software IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) de Arduino compila el texto.

Cuando encendemos el microcontrolador placa de Arduino Uno se guarda el tiempo transcurrido en la función millis () creando de esta manera subrutinas, en la primera instancia se tiene el inicio con la cual el microcontrolador se encuentra alimentada estableciendo las variables e identificando los pines pines utilizados.



## Capítulo V

### 5 Costos

Tomando en cuenta que el costo en sí es la suma total de gastos y recursos los cuales se invierten para producir un determinado elemento o producto terminado a partir de materia prima, los cuales comprenden desde los elementos adquiridos mediante una compra hasta aquellos elementos fabricados y la mano de obra.

En términos generales para determinar el costo del proyecto se consideran los costos de mano de obra, costos de fabricación (costo de materiales, insumos, mano de obra, equipos y herramientas) los cuales desarrollaremos a continuación.

#### 5.1 Costo de los materiales

Tabla 20. Costo de los materiales

Materiales	Características	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Precio total (Bs)
Minicompresor	Anexos	1	500	500
Tubo de PVC clase 9	Anexos	6 m	192	192
Tapa de PVC Esquema 40	Anexos	6	32	192
Electroválvula solenoide 5/2		2	90	180
Válvula extranguladora		1	10	10
Válvula antirretorno		1	10	10
Sensor de presión MPX 5500		1	142	142
Display nextión 2.8 pulg HMI		1	280	280
Fuente switching 12v 5A		1	75	75
Ventilador 12v 80*80		1	28	28
Ventilador 12v 25*25		1	18	18
Regulador de voltaje 5v 1A LM7805		1	3	3
Capacitor cerámico 0.33uF 0.1 uF		2	1	2
Relé 12v 10A		2	5	10
Diodo 4001		2	1	2
Transistor 2n2222 NPN		2	2.5	5
Regulador, manómetro 3 Bar y humidificador 1-10 l/min		1	315	315
Regulador 10 Bar		1	50	50
Acople rápido		12	5	60
Arduino Uno		1	65	65
Niple		6	20	120
Manguera neumática		3 m	6	18
Caja o carcasa		1	800	800
TOTAL				2277

Fuente. Elaboración propia

En este acápite se detallan los costos de la materia prima que se utiliza para la fabricación de los elementos que forman parte del proyecto lo cual nos servirá para determinar posteriormente el costo total de cada elemento fabricado, es importante destacar que el costo de estos materiales en bruto se obtuvo del mercado local.

## 5.2 Costos varios

Estos costos que variaran sin importar el número de servicios que se requiera teniendo en cuenta a los costos por insumo los cuales se utilizan en el proceso de fabricación, costo de alquiler y de utilización de la maquinaria, equipo y herramienta necesario las cuales se utilizaran para realizar las diferentes tareas.

Tabla 21. Costo de máquina

Detalle	Costo total (Bs)
Varios	1500

Fuente. Elaboración propia

## 5.3 Costos de mano de obra

Respecto al costo de la mano de obra calificada, cabe mencionar que realizando el análisis exacto los cuales sirven de indicador de competitividad pueden variar según la libre oferta y demanda del mercado interno en la ciudad de La Paz, sin embargo, no existe una variación significativa de los mismos.

Tabla 22. Costo de mano de obra

Operario	Nº de horas	Costo por hora (Bs)	Costo total (Bs)
Tornero	3	35	105
Otros			1095
Total			1200

Fuente. Elaboración propia

#### 5.4 Resumen de costos (Costo neto)

Realizando el resumen de todos los costos realizados los cuales fueron determinados aproximadamente los cuales incluyen costo de materiales, costo de insumos, costo de mano de obra, costo de máquina y herramientas utilizados con lo que finalmente podremos determinar el costo neto.

Tabla 23. Resumen de costo

N°	Tipo	Total
1	Costo de materiales	2277
2	Costo varios	1500
3	Costo de mano de obra	1200
	Total	4977

Fuente. Elaboración propia

#### 5.5 Precio final

Determinando el precio final previamente debemos determinar un precio parcial él se encuentra constituida por la sumatoria del costo neto, costo por utilidad y el costo debido a diferentes imprevistos los cuales se pueden suscitar al realizar la construcción del concentrador portátil de oxígeno los cuales se detallan a continuación.

Tabla 24. Precio final

N°	Detalle	Total (Bs)
1	Costo neto	4977
2	Margen de utilidad (al 25 % sobre el costo neto)	1244.25
3	Costo por imprevistos (al 10 % sobre el costo neto)	497.7
	Precio	6718.95

Fuente. Elaboración propia

Determinando el precio final del proyecto y teniendo en consideración las obligaciones que se tiene en el país los cuales son:

13 % IVA Impuesto al Valor Agregado

3 % IT Impuesto a las Transacciones

Con lo cual el precio final se llega a determinar con la ayuda de las siguientes ecuaciones

$$P_f = P + I \quad \boxed{5.1}$$

$$I = 0.13(P_f - C_f) + 0.03P_f \quad \boxed{5.2}$$

Reemplazando la ecuación 5.2 en la ecuación 5.1

$$P_f = P + 0.13(P_f - C_f) + 0.03P_f \quad \boxed{5.3}$$

$$P_f = \frac{P - 0.13C_f}{0.84}$$

Donde

$P_f$  = Precio final (facturado Bs)

I = Impuestos Bs

P = 6718.95 Precio (no incluye impuestos Bs)

$C_f$  = 1124 Costo de ítems facturado

Evaluando los parámetros descritos en la ecuación 5.3 se tiene

$$P_f = \frac{6718.95 - 0.13 \times 1124}{0.84} = 7824.79$$

Tabla 25. Detalle del precio final

Detalle	Total (Bs)
Precio final	7824.8

Fuente. Elaboración propia



Por lo tanto, el precio final del proyecto del diseño de un concentrador portátil de oxígeno medicinal para su puesta en marcha y funcionamiento llegaría a costar un aproximado 7824.8 Bs (bolivianos).



## CAPÍTULO VI

### 6 Evaluación

#### 6.1 Evaluación técnica

Revisando el diseño del concentrador portátil de oxígeno es necesario realizar la evaluación de la factibilidad técnica (si se dispone de conocimiento, habilidades, equipos o herramientas necesarios) y de construcción experimental como también de su producción en comparación con la empresas dedicadas a la distribución de estos dispositivos mediante una comparación realizada de los costos de inversión por el diseño generado, esta evaluación permitirá verificar de manera general si esta alternativa es conveniente de acuerdo a las posibilidades económicas, tecnológicas y la necesidad actual que atraviesa nuestro país.

Para realizar la evaluación técnica se tiene que tomar en cuenta los aspectos fundamentales que nacen de la necesidad que tiene nuestra ciudad y nuestro país para contar con este concentrador portátil de oxígeno de acuerdo a la norma de la calidad de oxígeno de IBNORCA.

Como se trata de un dispositivo que se encargara de los pacientes con problemas respiratorios, el objetivo del proyecto será la de satisfacer la necesidad cumpliendo las especificaciones en cuanto a fácil manejo, sencillez y funcionabilidad de manera que el paciente se sienta a gusto al momento del manipuleo.

#### 6.2 Evaluación económica

Al realizar la evaluación económica es importante destacar la finalidad con la cual se usará el concentrador portátil de oxígeno, a lo largo del proyecto se pretendió justificar y explicar cada decisión tomada al momento de realizar el diseño, prueba de todo ello es la utilización de tablas y figuras en conjunto con las ecuaciones planteadas, se

indago en aspectos teóricos al realizar este proyecto no solo en el diseño también en el propósito con la cual se pretende dar fin a los estudios realizados.

### **6.3 Recomendaciones**

Es necesario realizar el diseño del mini compresor de aire de acuerdo a las especificaciones requeridas por el concentrador portátil de oxígeno como complementación a este proyecto.

Sería muy satisfactorio que en nuestro país se venda el mineral de zeolita 13X HP el cual se hizo traer desde Perú ya que dicha empresa Sani Importadores no cuenta con distribuidores autorizados y el único mineral parecido es la clinoptinolita cual informan que es muy similar a la zeolita 5A.

De cara a futuros estudios sería conveniente analizar el ciclo de Adsorción por Oscilación de Presión (PSA), el cual identifica las características del proceso de concentración de oxígeno en el desarrollo de futuros proyectos afines a los concentradores portátiles de oxígeno.

### **6.4 Conclusiones**

Se encontró una solución mediante el ciclo del PSA y sus etapas de adsorción, desorción y purga de acuerdo a las necesidades requeridas por nuestra sociedad teniendo en consideración la función del trabajo desempeñado por el dispositivo.

Los cálculos realizados en el presente proyecto son de gran ayuda al momento de obtener los resultados del diseño del concentrador portátil de oxígeno.

El proyecto del concentrador portátil de oxígeno supone una contribución para su aplicación en la medicina para pacientes con problemas respiratorios en la ciudad de La Paz y para toda Bolivia siendo capaz de proporcionar oxígeno de alta pureza bajo las normas de la calidad de oxígeno de IBNORCA.

Es recomendable informarse bastante con artículos, textos sobre separación de gases mediante la oscilación de presión y materiales para el sector medico los cuales se encuentren en el mercado.

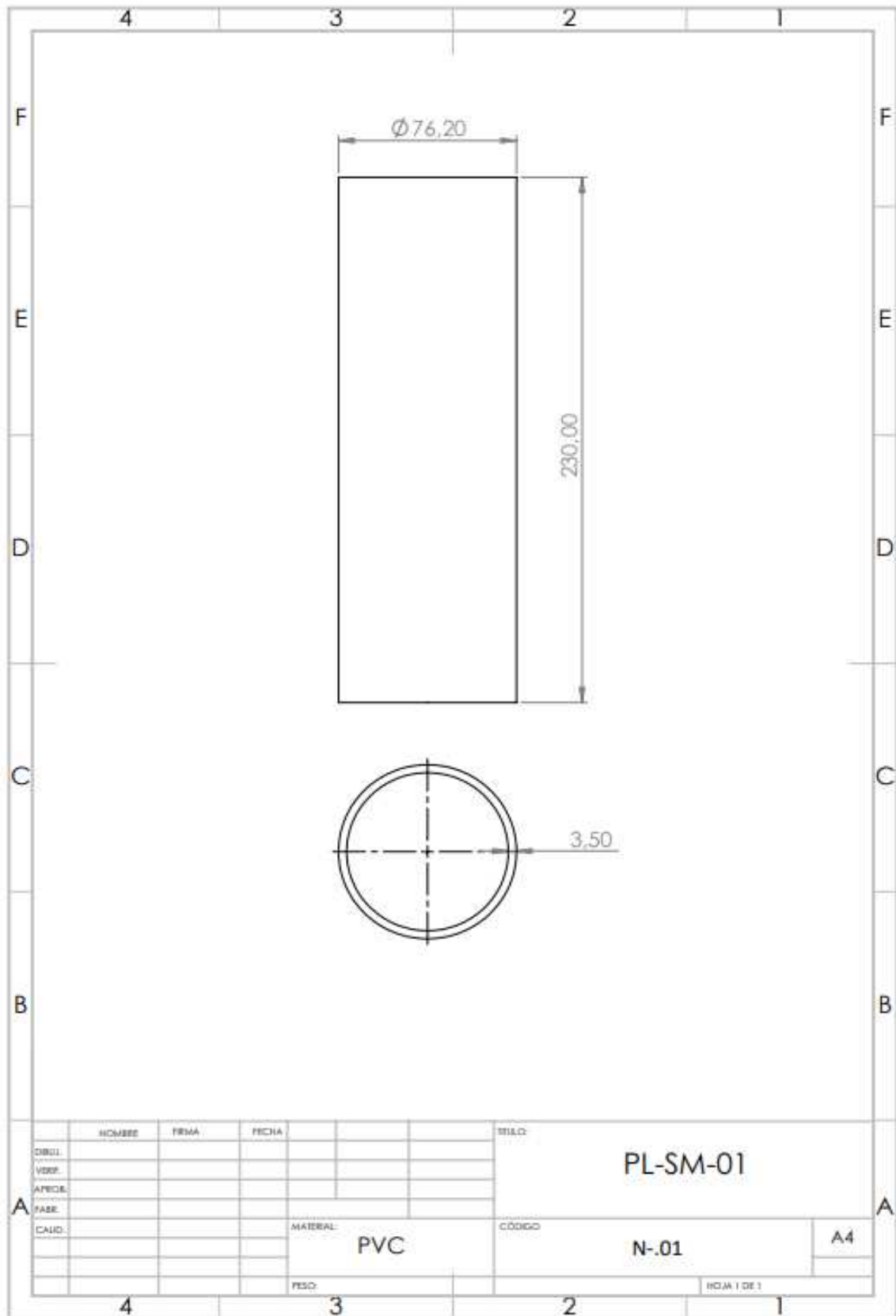
Espero simplificar y plasmar todo sobre los concentradores portátiles de oxígeno en este proyecto de grado con el hincapié de que sea de fácil entendimiento y con el prototipo pretendo garantizar de que se pueda utilizar en pacientes con problemas respiratorios.

## 6.5 Referencias

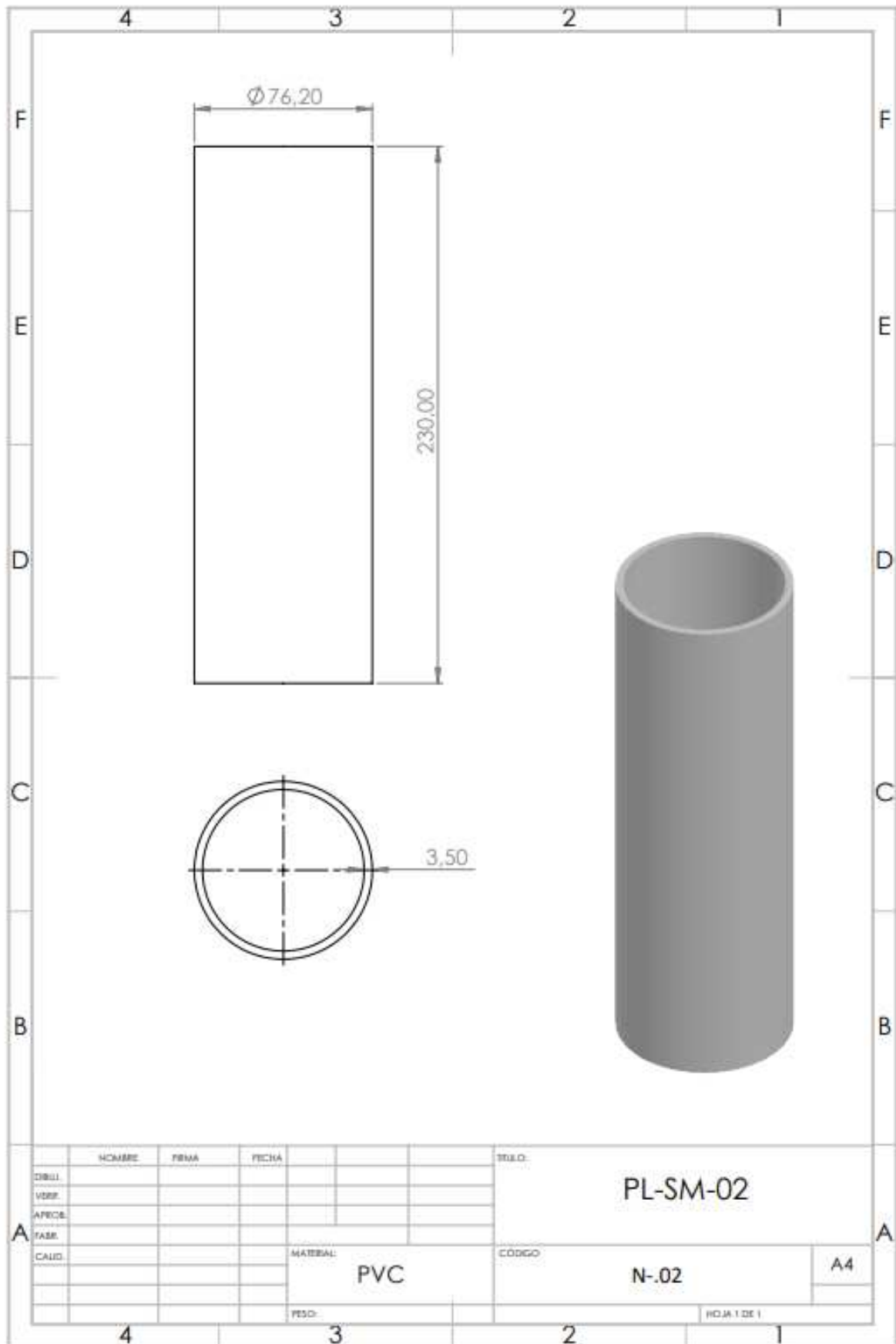
- [1] <https://ocw.unican.es/mod/page/view.php?id=553>.
- [2] D. Ruthven, S. Farooq y K. Knaebel "Pressure Swing Adsorption" New York VCH Publishers 1994.
- [3] R. Yang "Gas separation by adsorption processes" Stoneham butterworth Publishers 1986.
- [4] D. Do "adsorption analysis" Equilibria and kinetics London imperial college press 1998.
- [5] D. Ruthven "principles of adsorption processes" Wiley 1984.
- [6] C. Fernández Martín "The Promising Application of Microwaves in Carbon Capture and Storage" Ampere Newaletter, 10 de octubre 2016 pg. 19 – 21.
- [7] Ariel Capote Sánchez "Diseño de un generador de oxígeno para su aplicación en piscicultura" Bogota 2018.

7 Anexos

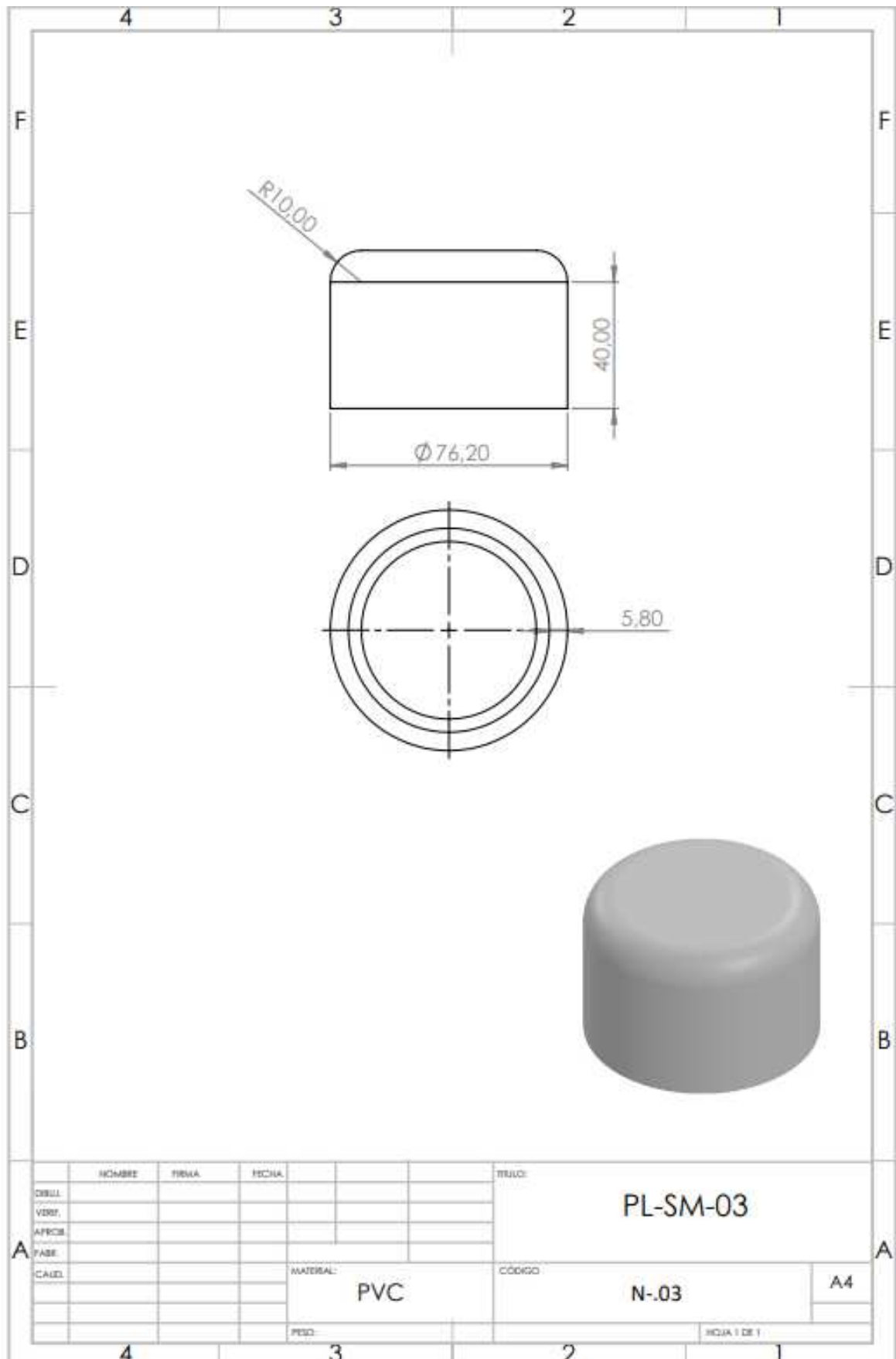
Anexo 1. Plano de la celda de zeolita



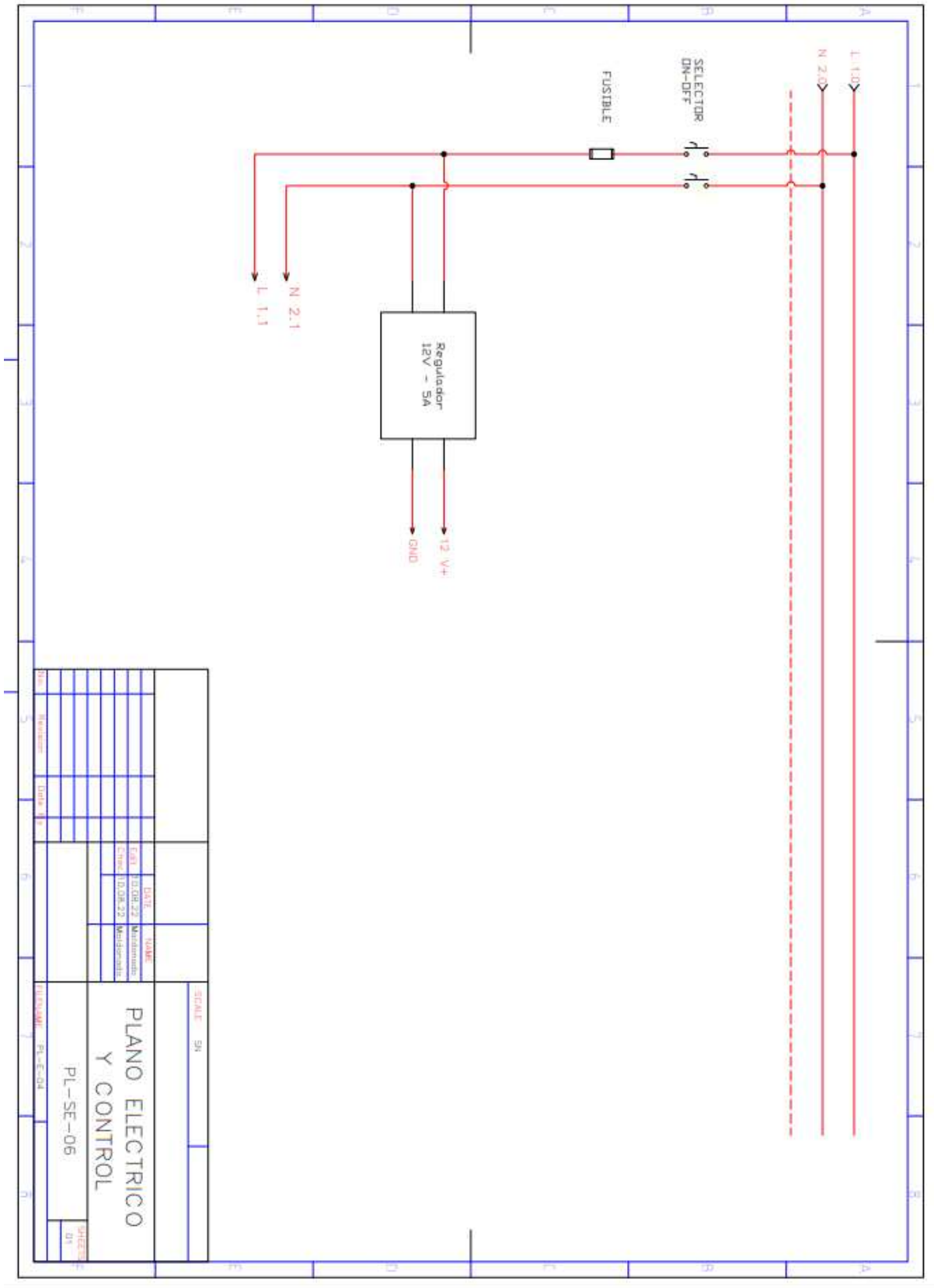
Anexo 2. Plano acumulador



Anexo 3. Plano tapa de zeolita



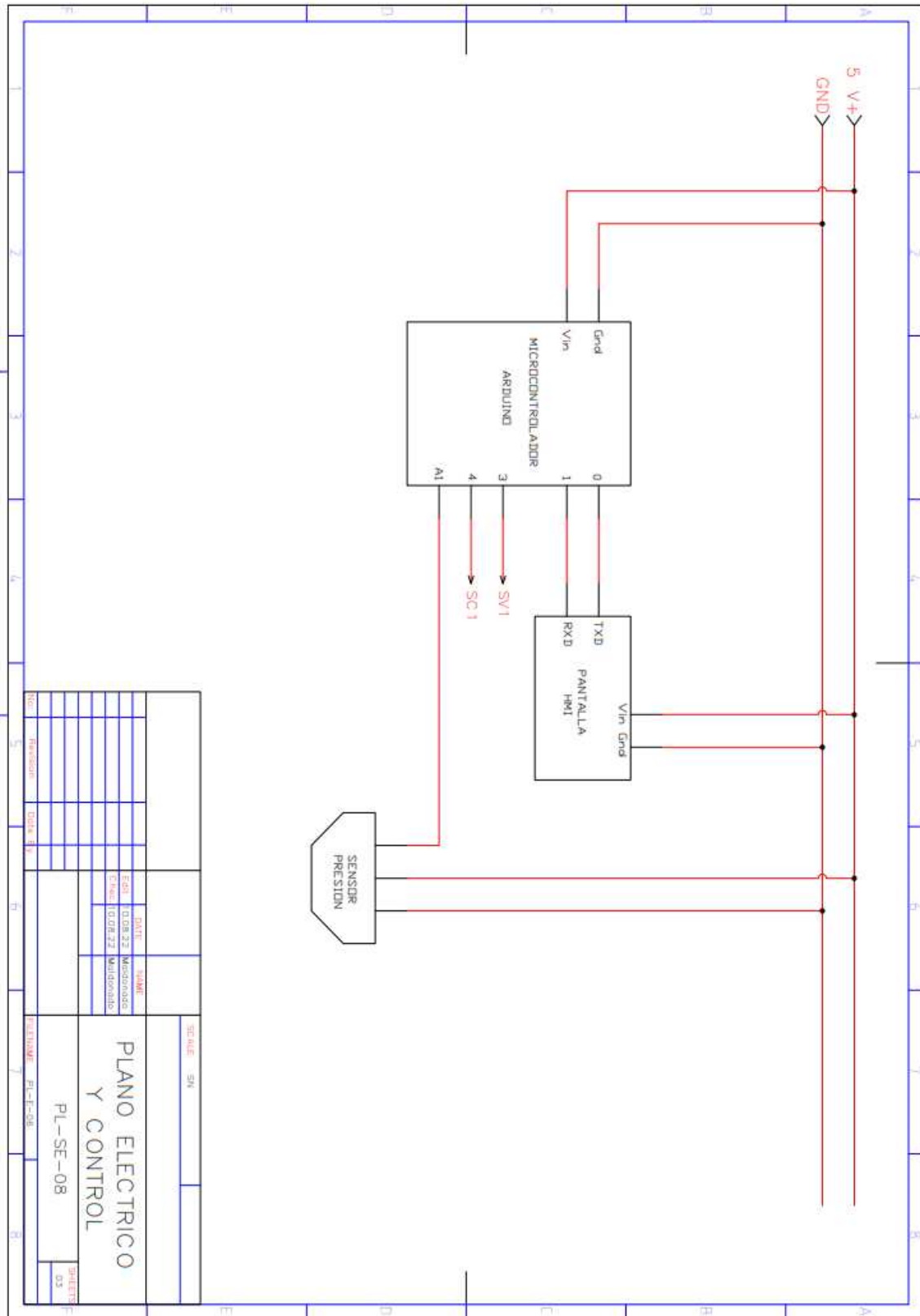
Anexo 4. Plano eléctrico





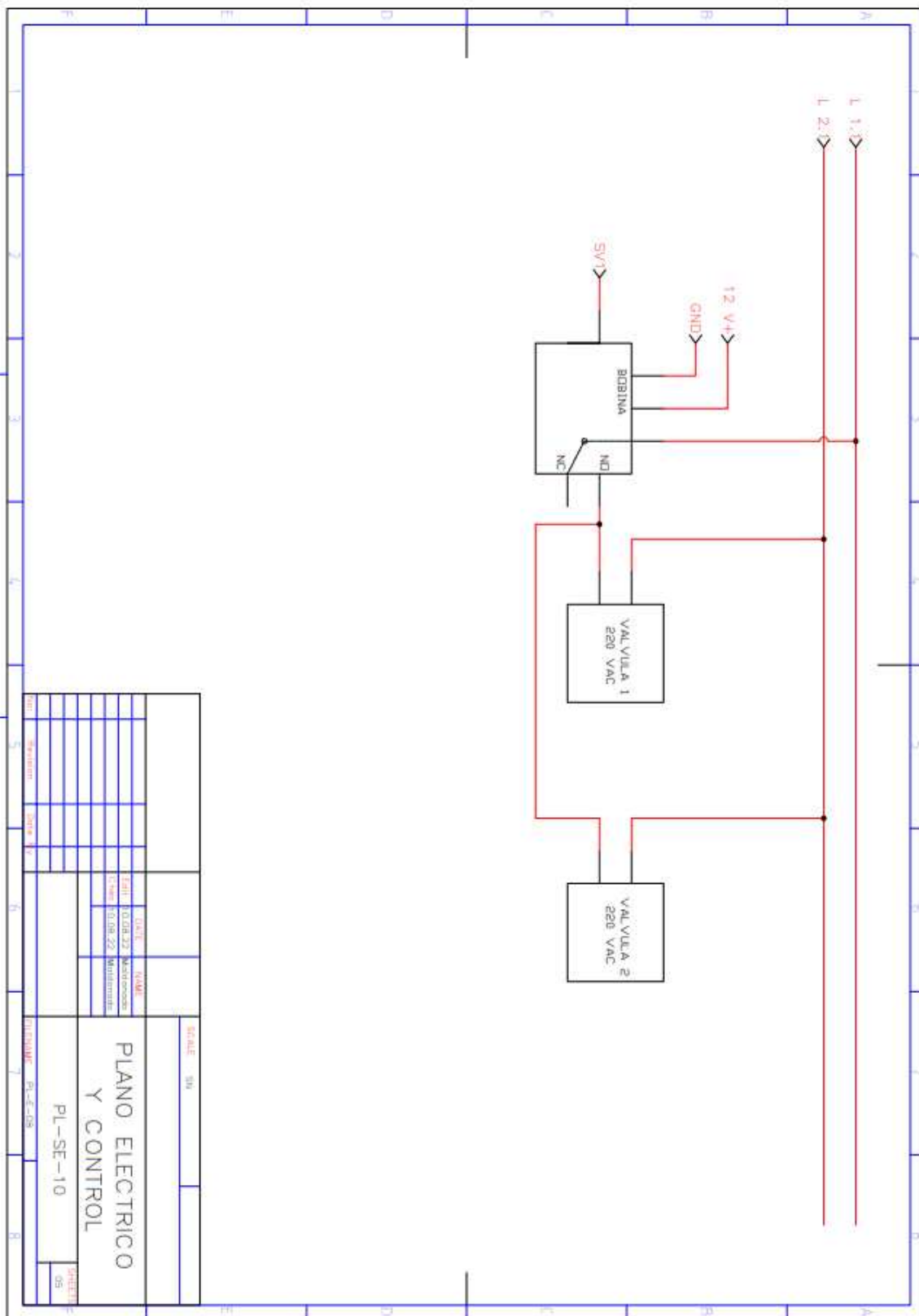


Anexo 6. Plano eléctrico

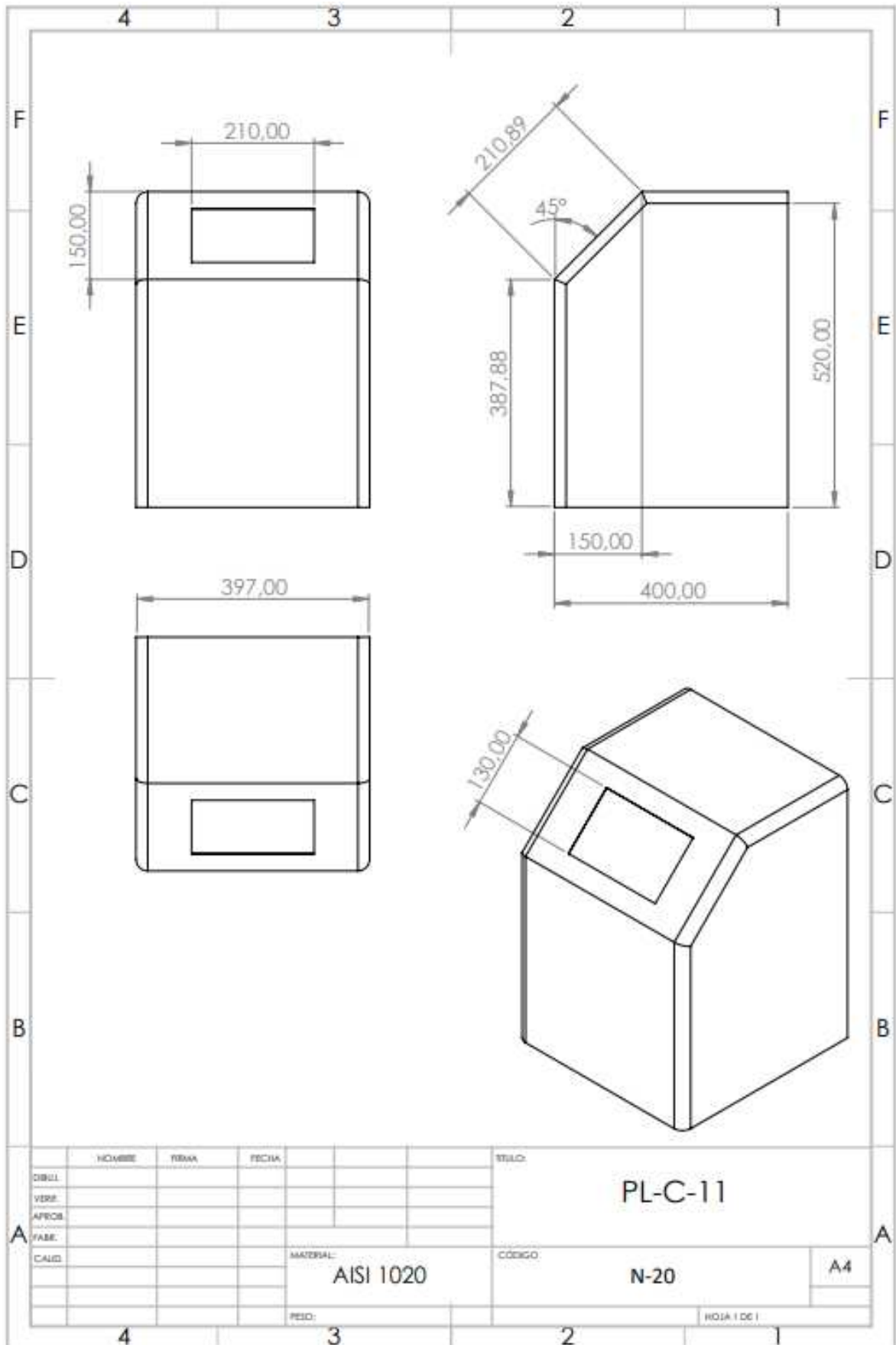




Anexo 8. Plano eléctrico



Anexo 9. Plano carcasa



Marvin Maldonado Morales

Correo electrónico: [mm3757127@gmail.com](mailto:mm3757127@gmail.com)

Celular: 72088493



MINISTERIO DE DESARROLLO  
PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
**RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2080/2023**  
La Paz, 31 de Julio del 2023

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **24 de Julio del 2023**, por **MARVIN MALDONADO MORALES** con C.I. N° **6986795 LP**, con número de trámite **DA 1077/2023**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "**Diseño de un concentrador de oxígeno portátil de oxigenoterapia para el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas IIME**", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*".



**"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"**

Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
E. Batallón Millamani.  
Telfs.: 2195700 - 2195276  
2195191 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3127152 - 72062936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 6440403 - 72062957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Lda. Piso 2, Of. 58,  
zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72062909

Oficina - Chuquiaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casí esq. Urrutiolagoitia,  
zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre,  
N° 5837, entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14 (Ex Banco Fie).  
Telf.: 6220288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM, Salinas N° 300,  
Primer Piso, Of. 17.

[www.senapi.gob.bo](http://www.senapi.gob.bo)



Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.


#### POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

#### RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"Diseño de un concentrador de oxígeno portátil de oxigenoterapia para el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas IIME"**, a favor del autor y titular: **MARVIN MALDONADO MORALES** con C.I. Nº 6986795 LP, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

  
Abg. Carlos Alberto Soruco Arroyo  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



CASA/mmt  
c.c Arch



#### "2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, Nº 595,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2195700 - 2195716  
2195951 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijano,  
Nº 26, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3107951 - 72043936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bellas, Nº 751,  
entre 46 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 6144409 - 72043957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, Nº 3550  
Edif. Mallizentro El Ceibo  
lto. Piso 2, Of. 58,  
zona 16 de Julio.  
Telfs.: 7041001 - 72043079

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, Nº 366  
casi esq. Urrutagolitia,  
zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72049873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avarosa  
Edif. Santa Clara, Nº 243.  
Telf.: 72019586

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre,  
Nº 5837, entre Ayacucho  
y Jumin, Galería Central,  
Of. 14 (Ex Banco Fie).  
Telf.: 62201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas Nº 262,  
Primer Piso, Of. 17.

[www.senapi.gob.bo](http://www.senapi.gob.bo)



**SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL**  
**DIRECCION DE DERECHO DE AUTORES Y CONEXOS**

**OBRA REGISTRADA MEDIA**

Res. Admin No. 1-2080/2023

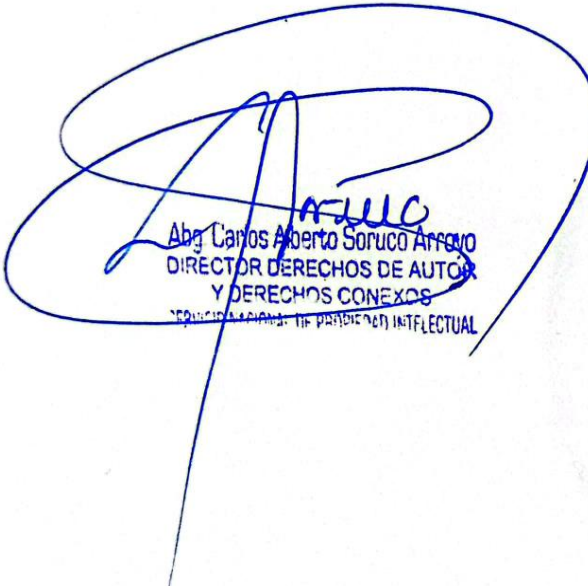
Título de la obra: DISEÑO DE UN CONCENTRADOR

Autor: MARVIN MALDONADO MORALES

Titular: MARVIN MALDONADO MORALES

Fecha: 31-07-23 a Paz - Bolivia

UNIDAD DE REGISTRO  CHO DE AUTOR

  
Abg Carlos Alberto Soruco Arce  
DIRECTOR DERECHOS DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

  
Maritza Nery Cusi Tanjui  
TEC. EN REVISION DE SOLICITUD DE REGISTRO  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL