



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Propiedades y aplicaciones del oxígeno, así como sus principales métodos
de producción e importancia durante la pandemia COVID-19.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN QUÍMICA INDUSTRIAL.

PRESENTA:

BALTAZAR COLIN ÁNGEL EDUARDO
MARTÍNEZ FLORES ANGÉLICA BERENICE

ASESORA: DRA. FRANCISCA ALICIA RODRÍGUEZ PÉREZ.

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



UNAM
CUAUTITLÁN
DEPARTAMENTO
de la FES Cuautitlán.

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional.**

Propiedades y aplicaciones del oxígeno, así como sus principales métodos de producción e importancia durante la pandemia COVID-19.

Que presenta el pasante: **Ángel Eduardo Baltazar Colin**
Con número de cuenta: **417106164** para obtener el título de: **Químico Industrial**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de Abril de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Eva Molina Trinidad	
VOCAL	Q. José Guadalupe García Estrada	
SECRETARIO	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	
1er. SUPLENTE	Dra. Sofia Piña Olmos	
2do. SUPLENTE	Dra. Margarita Ferat Toscano	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional.**

Propiedades y aplicaciones del oxígeno, así como sus principales métodos de producción e importancia durante la pandemia COVID-19.

Que presenta la pasante: **Angélica Berenice Martínez Flores**
Con número de cuenta: **313194306** para obtener el título de: **Química Industrial**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de Abril de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Eva Molina Trinidad	
VOCAL	Q. José Guadalupe García Estrada	
SECRETARIO	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	
1er. SUPLENTE	Dra. Sofía Piña Olmos	
2do. SUPLENTE	Dra. Margarita Ferat Toscano	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirnos llegar hasta este momento, y no desampararnos en algún momento de toda esta etapa.

A mis padres por apoyarme incondicionalmente en todo momento. Por brindarme su ejemplo de luchar por lo que deseo y no rendirme hasta conseguirlo.

A mi compañero, amigo, colega y esposo Ángel por haberme apoyado en todo proceso de esta etapa de nuestra vida, por tener la paciencia y enseñarme cada día a trabajar por lo que quiero.

A mi alma mater, mi Universidad Nacional Autónoma de México que me dio las mejores oportunidades, beneficios y experiencias desde la preparatoria.

A nuestra asesora la Doctora Alicia por habernos apoyado tanto en este proceso.

A nuestro valioso jurado por habernos retroalimentado en la culminación de este proyecto.

Angélica Berenice Martínez Flores

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme sus instalaciones, oportunidades y por acogermme para crecer profesionalmente.

A la Doctora Alicia por brindarnos de su apoyo en la realización de este proceso.

A mis padres y hermanos, por apoyarme y motivarme a lo largo de este camino.

A mi esposa y compañera de profesión Angélica por su apoyo incondicional y por haberme inculcado hábitos que me han ayudado en la realización de este proyecto, por motivarme para perseguir siempre mis deseos y por seguir ayudándome a superarme en la vida profesional.

Agradezco a Dios por permitirnos estar en este proyecto juntos, por haber coincidido en el camino de la superación y poder motivarnos mutuamente.

Ángel Eduardo Baltazar Colín

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mi bella familia, a mi abuelita Ma. De la Luz por haberme tenido tanta paciencia, apoyarme y darme ánimos siempre, a mi tía Ana que desde el cielo me sigue impulsando a no conformarme y concluir mis proyectos, "porque el papel es lo que vale".

Angélica Berenice Martínez Flores

Dedicó esta tesis a mi familia, a mis padres y hermanos que me alentaron en cumplir mis sueños y aspiraciones, para lograr culminar mis proyectos y poder consolidarme como un profesionista.

Ángel Eduardo Baltazar Colín

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ABREVIATURAS.....	10
SIGLAS.....	10
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN: EL INICIO.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 General.....	15
2.2 Particulares.....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	16
4. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES DEL OXÍGENO.....	17
4.1 Origen del oxígeno.....	17
4.2 Descubrimiento del oxígeno.....	17
4.3 Composición del aire atmosférico.....	23
4.4 ¿Qué es el oxígeno?.....	25
4.5 Propiedades del oxígeno.....	25
4.6 Toxicidad del oxígeno.....	26
4.7 Especies reactivas del oxígeno (ERO); estructura electrónica y formación.....	26
4.7.1 Estructura electrónica del oxígeno y del oxígeno singulete.....	26
4.7.2 Formación de las especies reactivas de oxígeno (ERO).....	28
4.8 Formas alotrópicas del oxígeno.....	29
4.9 Principales compuestos contaminantes que se forman con el oxígeno.....	31
4.9.1 Monóxido de carbono (CO).....	31
4.9.2 Óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ , NO _x).....	31
4.9.3 Dióxido de azufre (SO ₂).....	32
4.9.3.1 Reacciones del oxígeno con azufre SO _x	32
4.9.3.2 Aerosoles de SO ₂	33
4.9.4 Principales elementos de la tabla periódica que se combinan con el oxígeno.....	34
5. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE OXÍGENO.....	35
5.1 Producción natural de oxígeno mediante la fotosíntesis.....	35
5.2 Métodos industriales de producción de oxígeno.....	36
5.2.1 Producción de oxígeno mediante la electrólisis de agua.....	36
5.2.1.1 Principales tipos de electrolizadores.....	40
5.2.1.2 Electrolizadores alcalinos.....	40

5.2.1.3	Electrolizadores de membrana de intercambio protónico (tipo PEM).....	41
5.2.1.4	Electrolizadores de óxido sólido.	43
5.2.1.5	Comparación de los diferentes electrolizadores.....	44
5.2.3	Producción de oxígeno mediante un sistema PSA (Pressure Swing Adsorption).	50
5.2.3.1	Origen de las zeolitas.	55
5.2.3.2	Principales usos de las zeolitas.	57
5.2.3.3	Importancia de las zeolitas.	57
5.2.3.4	Funcionamiento de la zeolita para concentrar el oxígeno en una planta PSA.	57
5.2.4	Separación por membrana.....	58
5.2.4.1	Ventajas del sistema de producción por separación de membrana.	59
5.2.4.2	Descripción del proceso de separación de oxígeno con el uso de unidades de membranas.	61
5.2.4.3	Sistemas de membrana de una etapa.	63
5.2.4.6	Membranas utilizadas en la separación del oxígeno.....	63
5.2.4.6.1	Membranas poliméricas de difusión.	64
5.2.4.6.2	Membranas de transporte iónico-electrónico de tipo MIEC.	65
5.2.5	Concentradores de oxígeno.	67
5.2.5.1	Tipos de concentradores de oxígeno.....	68
5.2.5.3	Funcionamiento de los concentradores de oxígeno.....	69
6.	APLICACIONES DEL OXÍGENO	71
6.1	Oxígeno industrial.....	71
6.1.1	Oxígeno industrial en la producción de ozono para tratamiento de aguas (90 % a 95 % de pureza).	72
6.1.2	Producción de metal utilizando oxígeno industrial (hasta 95 % de pureza).	73
6.1.3	Producción de vidrio utilizando oxígeno industrial (95 % de pureza).	73
6.1.4	Lixiviación de oro y plata asistida por oxígeno industrial.	74
6.2	Oxígeno medicinal.....	75
6.2.1	Clasificación de oxígeno medicinal.	75
6.2.2	Aplicaciones del oxígeno medicinal.....	76
6.2.2.1	Oxígeno medicinal usado en piscicultura.....	76
6.2.2.2	Uso de oxígeno medicinal en hospitales militares y de campaña.....	76
6.2.2.3	Uso médico del oxígeno medicinal.	77
6.3	Aplicaciones del oxígeno en forma de ozono.....	77
6.3.1	Ozonoterapia.	77
6.4	¿Qué es el coronavirus?.....	78
6.4.1	¿Cuál es la diferencia entre SARS-CoV-2 y COVID-19?.....	78
6.5	Oxigenoterapia.....	78

6.5.1 Oxigenoterapia en pacientes con COVID-19.....	79
6.5.1.1 Consecuencias que trae la falta de oxígeno en el cuerpo.....	79
6.5.1.2 Cuando utilizar oxígeno medicinal.....	80
6.5.1.4 ¿Qué pasa si se utiliza oxígeno medicinal sin necesitarlo?	80
6.5.1.5 ¿Por qué medir el oxígeno es clave en pacientes de COVID-19?	80
7. NORMATIVA PARA CONSIDERAR AL OXÍGENO COMO MEDICINAL.....	80
7.1 Oxígeno al 93 %.....	82
7.2 Normas internacionales sobre las especificaciones del oxígeno medicinal.....	82
7.3 Especificaciones que debe de cumplir el oxígeno para que sea medicinal.....	83
7.4 Especificaciones que debe de tener un concentrador de oxígeno, apegado a la norma ISO 8359:1996.....	83
7.4.1 Control de flujo.....	84
7.4.2 Indicadores y alarmas.....	84
7.4.3 Salidas.....	84
7.4.4 Caja.....	85
8. DISTRIBUCIÓN Y SUMINISTRO DE OXÍGENO MEDICINAL.....	85
8.1 Tipos de contenedores para suministro de oxígeno medicinal.....	91
8.1.1 Termos portátiles para surtir oxígeno medicinal.....	92
8.1.2 Termos estacionarios para surtir oxígeno medicinal.....	93
8.2 Seguridad y riesgos comunes en la manipulación del oxígeno.....	96
8.2.1 Riesgos comunes.....	96
8.2.2 Elementos de seguridad e identificación del oxígeno medicinal.....	96
8.3 Cilindros de gas comprimido.....	98
8.3.1 Propiedades, clasificación y apariencia.....	98
8.3.2 Funcionamiento de los cilindros de oxígeno comprimido.....	99
9. INCREMENTO DEL CONSUMO DE OXÍGENO MEDICINAL DEBIDO A LA PANDEMIA DE COVID-19.....	100
9.1 Principales industrias productoras de oxígeno medicinal en México.....	102
9.2 Hospitales que se quedaron sin oxígeno.....	103
9.3 Producción de oxígeno de la empresa CRYOINFRA en México antes y durante la pandemia COVID 19.....	103
9.3.1 Volumen de Producción y Comercio Exterior de oxígeno, antes de la pandemia COVID-19.....	103
9.3.2 Valor de la Producción y Comercio Exterior.....	104
9.3.3 Volumen de producción y Valor de Ventas de oxígeno, antes de la pandemia COVID-19.....	104
9.3.4 Volumen de Producción y Comercio Exterior de oxígeno, durante la pandemia de COVID-19.....	105
9.3.5 Valor de la Producción y Comercio Exterior.....	105

9.3.6 Volumen y Valor de Ventas.....	105
10. ACCIDENTES OCURRIDOS POR MALA MANIPULACIÓN DE OXÍGENO A CAUSA DEL PÁNICO POR LOS ESCASES DEL GAS EN LA PANDEMIA DE COVID-19.....	107
11. CONCLUSIONES.	109
12. BIBLIOGRAFÍA.	110

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Experimento de Scheele, aparato para recoger oxígeno.....	18
Figura 2. Experimento de Joseph Priestley.....	20
Figura 3. Experimento de Antoine Lavoisier.....	20
Figura 4. Dispositivo de licuefacción de gas inventado por Louis-Paul Cailletet en 1877.....	21
Figura 5. Termo de Dewar.....	22
Figura 6. Robert Boyle.....	23
Figura 7. Sir Humphry Davy.....	23
Figura 8. Henry Cavendish.....	24
Figura 9. Símbolo del oxígeno.....	25
Figura 10. Estructura molecular en 3D del dióxigeno.....	29
Figura 11. Estructura molecular en 3D del ozono.....	30
Figura 12. Esquema de un sistema típico de electrólisis del agua.....	37
Figura 13. Diagrama de proceso de la electrólisis.....	39
Figura 14. Modelo del electrolizador alcalino.....	41
Figura 15. Modelo de un electrolizador de membrana de intercambio protónico.....	42
Figura 16. Modelo de un electrolizador de óxido sólido.....	43
Figura 17. Esquema de producción de gases por un sistema criogénico.....	48
Figura 18. Esquema en bloque de un sistema de generación de oxígeno por PSA.....	52
Figura 19. Unidad mínima de construcción de las zeolitas.....	55
Figura 20. Estructura de la unidad de sodalita.....	56
Figura 21. Separación por membrana.....	58
Figura 22. Funcionamiento en la separación de membrana.....	59
Figura 23. Sistema de membranas ITM.....	61
Figura 24. Esquema del proceso de separación de oxígeno por cuatro unidades de membrana en serie.....	62
Figura 25. Esquema de un sistema de obtención de oxígeno basado en membranas poliméricas de difusión.....	65
Figura 26. Tipos de membranas basadas en el transporte de iones de oxígeno. (a). Membranas de conducción iónica pura. (b) Membranas de conducción mixta iónica-electrónica, mono-fase (I) y doble-fase (II).....	67
Figura 27. Esquema del funcionamiento de un concentrador de oxígeno.....	70
Figura 28. Etapas más comunes de un sistema de purificación de agua.....	72
Figura 29. Producción de metal (Au, Cu, Pb, Ag) utilizando oxígeno.....	73
Figura 30. Producción de vidrio utilizando oxígeno.....	73
Figura 31. Inyección de oxígeno mediante difusores en el tanque de cianuración.....	75
Figura 32. Distribución de 4 difusores en un tanque de cianuración.....	75

Figura 33. Piscifactorías.....	76
Figura 34. Diagrama de los ensayos de identificación de oxígeno medicinal.	81
Figura 35. Valoración de oxígeno medicinal con gases de referencia.	82
Figura 36. Diferentes tipos de contenedores para suministro de gases.	91
Figura 37. Cilindros de oxígeno medicinal.....	92
Figura 38. Principales partes de un termo portátil, incluyendo los cortes para definir su interior.	93
Figura 39. Principales partes funcionales del tanque criogénico.	94
Figura 40. Parte inferior del termo estacionario.....	95
Figura 41. Termo estacionario con su evaporador.	95
Figura 42. Rombos de seguridad de oxígeno medicinal.....	97
Figura 43. Gráfica de comparación de las ventas de oxígeno por toneladas antes y durante la pandemia COVID-19.....	106
Figura 44. Gráfica del valor de las ventas de oxígeno antes y durante la pandemia de COVID-19.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del aire seco no contaminado por volumen.	24
Tabla 2. Configuración electrónica de algunas de las moléculas del oxígeno diatómico en el orbital $2 \pi^*$	28
Tabla 3. Especies reactivas de oxígeno (ERO).	28
Tabla 4. Comparación de las principales tecnologías de electrólisis de agua.	44
Tabla 6. Ventajas y desventajas de los concentradores de oxígeno.	69
Tabla 7. Cuadro comparativo de normativas UNE-EN7396-1 y NFPA 99.	83
Tabla 8. Características de las diferentes fuentes de oxígeno.	86
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de fuentes de oxígeno.	87
Tabla 10. Componentes y medidas a tener con las diferentes fuentes de oxígeno.	88
Tabla 11. Usó de las diferentes fuentes de oxígeno recomendadas para EMT/SAAM.	90
Tabla 12. Comparación de los diferentes medios de almacenamiento de oxígeno.	97
Tabla 13. Diferencias entre concentradores de oxígeno y cilindros de gas comprimido.	98
Tabla 14. Producción de oxígeno en toneladas, antes de la pandemia.	103
Tabla 15. Producción de oxígeno en miles de dólares, antes de la pandemia.	104
Tabla 16. Volumen y valor de las ventas de oxígeno, antes de la pandemia.	104
Tabla 17. Producción de oxígeno en toneladas, durante la pandemia.	105
Tabla 18. Producción de oxígeno en miles de dólares, durante la pandemia.	105
Tabla 19. Volumen y valor de las ventas de oxígeno, durante la pandemia.	105

ABREVIATURAS

COFECE: Comisión Federal de Competencia.

ERO: Especies Reactivas de Oxígeno.

PROFECO: Procuraduría General del Consumidor.

PsO₂: Saturación de Oxígeno en Sangre.

SGIRyPC: Sistema de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil.

GE. General Electric Corporation.

USP: Farmacopea Americana

SIGLAS

EMT: Equipo Médico de Suministro de Emergencia.

FCC: por sus siglas en inglés, Craqueo Catalítico Fluido.

ITM: por sus siglas en inglés, Membrana de Transporte de Iones.

LTOT: por sus siglas en inglés, Terapia de Oxígeno a Largo Plazo.

MIEC: por sus siglas en inglés, Membranas Cerámicas de Conducción Mixta Iónica-Eléctrica.

NFPA: por sus siglas en inglés, Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego.

NTP: Norma Técnica Peruana.

PEM: por sus siglas en inglés, Membrana de Intercambio de Protones.

PSA: por sus siglas en inglés, Adsorción por Cambio de Presión.

ASI: por sus siglas en inglés unidades de separación de aire.

SAAM: Sitios Alternativos de Atención Médica.

SCT: por sus siglas en inglés, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

SRU: por sus siglas en inglés, Unidades de Recuperación de Azufre.

SSC: Secretarías de Seguridad Ciudadana.

USP: por sus siglas en inglés, Farmacopea Americana.

VOC: por sus siglas en inglés, Compuestos Orgánicos Volátiles.

VSA: por sus siglas en inglés, Adsorción por Oscilación al Vacío.

SNC: Sistema Nervioso Central.

GPU: Unidades de permeación de gas.

TEAS: Modelos tecnoeconómicos de trabajo.

EA: Electrolizador alcalino.

EOS: Electrolito a base óxidos sólidos.

PEM: Electrolito de membrana polimérica.

IGCC: Por sus siglas en inglés Gasificación integrada en ciclo combinado.

RESUMEN

En el presente trabajo se revisa la historia sobre el descubrimiento del oxígeno, se describen los primeros experimentos que realizaron científicos para conocer el oxígeno, así mismo, se redactan las principales propiedades del oxígeno, formas alotrópicas, la composición en la que se encuentra en el aire, además como fue tomando relevancia el oxígeno en la vida de los seres humanos debido a las propiedades que posee y a los compuestos que puede formar.

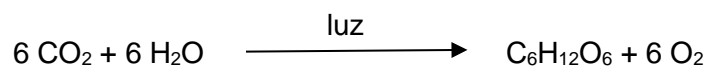
Se desarrollan los principales métodos de producción de oxígeno, los cuales muestran las principales etapas, ya que dependiendo del método de obtención es la aplicación del oxígeno. Por ejemplo, para el oxígeno medicinal se necesita un grado de pureza alto para ser usado en pacientes y debe ser producido con la calidad requerida, por otra parte, durante la pandemia COVID-19 se tuvo una escasez y desbaratamiento por parte de las empresas productoras de oxígeno de grado medicinal debido a que la producción no era suficiente para abastecer a la población. Entre los métodos de producción se encuentra la electrólisis, el cual consiste en separar el agua en oxígeno y gas hidrógeno; el método de licuefacción reside en el cambio de fases de los componentes del aire, al cambiar la presión y la temperatura para que de esta manera se separe el oxígeno con más pureza; el método de adsorción por oscilación de presión, (Pressure Swing Adsorption, PSA, por sus siglas en inglés), se fundamenta en pasar aire comprimido a través de un tamiz, por lo regular zeolitas y el último es el método de separación con membrana, la cual consiste en separar el oxígeno con una membrana con el tamaño de poro adecuado para hacer pasar el oxígeno y evitar el paso de los otros componentes del aire.

La investigación también se enfoca en mostrar las diferentes aplicaciones del oxígeno ya sea medicinal o industrial como: en la soldadura, tratamiento de aguas, obtención de metales, medicina, terapias, entre otros. Para llevar a cabo la aplicación del oxígeno depende de las necesidades que se tengan, ya que las características del oxígeno son muy amplias. Entre sus aplicaciones, se encuentra el oxígeno medicinal, que debe tener una alta pureza para que cumpla su función en oxigenar la sangre del paciente y evitar trastornos respiratorios. Así mismo, se describe la normativa para considerar el oxígeno como medicinal ya que si no posee las características necesarias no se considera apto para el uso en pacientes. Además, se describe el crecimiento en la demanda de oxígeno medicinal debido a la pandemia de COVID-19, ya que las principales empresas productoras tuvieron que abrir más sucursales para poder abastecer de oxígeno a la población enferma de COVID-19. Se muestra también, la distribución y almacenamiento del oxígeno, tipos de contenedores, riesgos y accidentes que se han tenido debido a una mala manipulación del oxígeno.

1. INTRODUCCIÓN: EL INICIO.

El oxígeno es un elemento químico de aspecto incoloro con número atómico 8, su símbolo es O y pertenece al grupo de los no metales y su estado habitual en la naturaleza es gaseoso (paramagnético). Algunas de las propiedades de los no metales como el oxígeno son, por ejemplo, malos conductores del calor, de electricidad y no tienen lustre (Gutiérrez Ríos, 1978).

El átomo de oxígeno fue uno de los primeros en formarse en el proceso de evolución química, sin embargo, la forma diatómica (molecular O₂) tardaría en aparecer porque la mayor parte del oxígeno se encontraba asociado a otros elementos (H, C, N, metales, etc.), y en este estado no era reactivo ni podía ser usado como aceptor final de electrones en las cadenas metabólicas. Las cianobacterias son un grupo de microorganismos procariotas fotosintéticos, cercano a las algas (bajo algunas clasificaciones se encuentran clasificadas como algas verde-azules) por la presencia de pigmentos fotosintéticos clorofílicos que, mediante la presencia de luz catalizan la siguiente reacción:



Esta reacción muestra el origen del oxígeno molecular a partir de la ruptura de las moléculas de agua y de esta forma se fue aportando durante millones de años el O₂ a la atmósfera, incrementando su concentración hasta cambiar su carácter de reductor a oxidante (Fonturbel, 2004).

Sin embargo el oxígeno no solo se emplea en procesos biológicos, es un elemento muy importante también en la industria, una de sus principales aplicaciones es la industria siderúrgica, entre el 65 % y el 85 % del oxígeno producido en todo el mundo se emplea en la producción de acero, se emplea para acelerar el proceso y para retirar el carbono del acero final, que suele contener en torno al 2 % de carbono. También se utiliza para limpiar impurezas de las planchas de acero y para cortar y soldar estas planchas, como por ejemplo en los sopletes de acetileno, capaces de cortar metal con suma rapidez. Otro de los grandes usos del oxígeno radica en la industria química, se emplea por ejemplo para fabricar óxido de acetileno, material básico para la fabricación de materiales plásticos y textiles. Además, en función de la proporción, temperatura y los catalizadores empleados, se forman distintos compuestos cuando el oxígeno reacciona con algunos combustibles como carbón o gas natural. Controlando las condiciones mencionadas, se puede obtener una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono que se emplea en la producción de gasolina sintética, metanol o amoníaco (Tudela Gallardo, 2019).

El oxígeno se utiliza en una variedad de aplicaciones: farmacéuticas, alimentaria para la conservación de alimentos envasados al vacío, médicas, acuicultura, gas de alimentación para generadores de ozono, aeroespacial, soplado de vidrio, lixiviación, reducción de NOx para quemadores de combustible y soldadura de oxígeno (LINDE, 2023).

El uso del oxígeno en lugar de aire puede incrementar el rendimiento y eficiencia del capital en muchas industrias y permite los procesos de captura de carbono. Es un gas industrial de ser trabajado posee la capacidad de aumentar la productividad, se utiliza para mejorar la combustión en hornos de vidrio y reducir las emisiones de NOx. Como gas industrial se utiliza para reemplazar o enriquecer el aire, incluso para incrementar la eficiencia de la combustión en la producción de metal ferroso y no ferroso. Es fundamental para las aplicaciones de desarrollo celular, se utiliza en fermentadores y biorreactores, ayuda a cumplir con las estrictas regulaciones medioambientales a través del uso de deslignificación, extracción oxidativa y tratamiento de aguas residuales, en las refinerías para incrementar la capacidad de las plantas de Craqueo Catalítico Fluido (FCC “por sus siglas en inglés”) y las Unidades de Recuperación de Azufre (SRU “por sus siglas en inglés”), y para mejorar las operaciones de tratamientos de aguas residuales, puede complementar e incluso reemplazar el aire en el depósito de aireación para maximizar la capacidad de tratamiento, minimizar las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC “por sus siglas en inglés”), reducir al máximo el olor y espuma (LINDE, 2023).

La vida está sustentada por la combinación de oxígeno con la hemoglobina de la sangre y es medida por una unidad llamada PsO_2 (saturación de oxígeno en sangre), cuyos valores normales oscilan entre 92 % a 98 %. Diversos factores pueden disminuir la combinación del oxígeno con la hemoglobina, que pueden llegar a producir desde una falta de energía hasta la muerte. Una de las soluciones médicas a esta deficiencia es suministrar oxígeno en mayor proporción al paciente, desde un 100 % en referencia a enfermedades extremas de neonatos o el inicio de tratamiento de traumas como, por ejemplo, envenenamiento por monóxido de carbono (CO), hasta un valor medio de 40 % en enfermos agudos o crónicos. Esta variación de concentración se logra mezclando el oxígeno con el aire (ambiente a aire artificial), y controlando la dosis a través de sistemas de monitoreo. Esta proporción siempre debe ser determinada y supervisada por médicos o paramédicos en caso de accidentes, pues el mantener elevadas concentraciones de oxígeno cuando no es necesario, puede ocasionar al paciente desde la sequedad de mucosas hasta incluso la muerte (Eliana Alfaro, 2013).

La producción de oxígeno medicinal es siempre una ayuda para la recuperación de las enfermedades respiratorias agudas, recuperación de post operatorios, para los procesos quirúrgicos y en general para solucionar una serie de patologías del ser humano. En la actualidad

están permitidos dos métodos de obtención de oxígeno en los hospitales que son el de adsorción atómica y los concentradores de oxígeno (Riojas Rodríguez, 2020).

El oxígeno medicinal se utiliza de manera generalizada en todos los entornos sanitarios, con aplicaciones que van desde la anestesia hasta el tratamiento con inhaladores. El oxígeno es un gas vital utilizado para tratar a las personas en todas las etapas de la vida, desde el momento en que realizamos nuestra primera respiración en adelante. Los hospitales no podrían dar servicio sin oxígeno y su suministro constante y fiable, debido a que el oxígeno se utiliza en quirófanos, en las unidades de cuidados intensivos y en salas de hospital, así como también es de suma importancia en la atención domiciliaria (Medigas, 2022).

Las tecnologías actuales para la separación del aire incluyen la destilación criogénica, la adsorción por cambio de presión y la separación por membranas; sin embargo, la elección de la tecnología apropiada depende de la escala de producción y la concentración final de oxígeno requerido. La destilación criogénica permite obtener purezas de oxígeno mayores al 99 % y es la tecnología utilizada a gran escala (> 100 ton/día), debido a que las otras tecnologías no son competitivas en estas magnitudes de producción de oxígeno. El funcionamiento de esta tecnología está basado en la diferencia en el punto de ebullición de los gases que componen el aire, y sus requerimientos energéticos son altos debido principalmente a las altas presiones para la separación del aire. Por su parte, la adsorción por cambio de presión requiere adsorbentes naturales y sintéticos, entre los que se encuentran las zeolitas, que adsorben nitrógeno y dejan pasar el oxígeno, permitiendo obtener purezas de O₂ hasta el 95 %; es utilizada a mediana y gran escala (20-100 ton/día). Esta tecnología puede ser de adsorción por presiones oscilantes o por temperaturas oscilantes (PSA, por sus siglas en inglés), según las condiciones de trabajo, por diferencial de presión o por diferencial de temperatura. Para mejorar los porcentajes de separación se han realizado combinaciones de esta tecnología con membranas poliméricas, y se han logrado incrementos en la concentración de oxígeno de hasta el 98 % (Cacua-Madero, 2013).

Por todos los hechos anteriormente mencionados es importante hacer una recopilación acerca del oxígeno, ya que fue un recurso que tuvo alta demanda en consecuencia de la pandemia del COVID-19, incrementando su producción en grandes medidas por las principales empresas de la república mexicana y del mundo, por ser un gas que nos permite respirar y de mucha ayuda para las personas que padecían enfermedades respiratorias como el COVID-19.

2. OBJETIVOS

2.1 General

- Realizar una investigación sobre las propiedades, los diferentes métodos de producción industrial y aplicaciones del oxígeno, mediante la revisión bibliográfica de los diferentes procesos de producción y distribución, para conocer la emergencia que generó durante la pandemia de COVID 19 debido a la escasez.

2.2 Particulares

- Explicar cómo fue el origen del oxígeno en la tierra, por medio de su producción natural para saber cómo se fue saturando la tierra de este gas.
- Saber cuáles son las principales especies contaminantes, que se forman con el oxígeno y sus efectos sobre el medio ambiente.
- Describir las propiedades y aplicaciones del oxígeno industrial y medicinal, que dan paso a sus principales aplicaciones.
- Determinar qué pureza debe de tener el oxígeno para ser utilizado en enfermedades respiratorias.
- Investigar los diferentes métodos de producción del oxígeno y con ellos saber cuál es el más utilizado en la industria de producción de gases.
- Averiguar las normas que debe de cumplir el oxígeno para poder ser utilizado con fines médicos.
- Recopilar información de las principales empresas productoras de oxígeno en México y su crecimiento durante la pandemia de COVID-19.
- Conocer los diferentes tipos de dispositivos utilizados para la distribución de oxígeno y sus principales ventajas y diferencias.

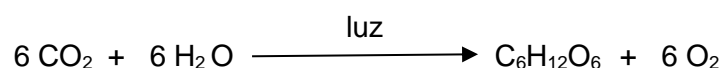
3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la pandemia de COVID-19 se desarrolló una sobredemanda de oxígeno medicinal ya que fue el principal tratamiento para el virus del SARS-CoV-2 el cual produce una enfermedad respiratoria severa, lo que acarreo el agotamiento de este gas, debido a las compras de pánico y por el alto índice de contagios, es por ello que es importante conocer cuáles son los métodos de producción, algunos de ellos generan pureza menor para ser considerado medicinal sin embargo, es utilizado para diversas aplicaciones en la industria, las características debe poseer, normas que se aplican a este producto para que pueda ser utilizado con fines médicos, así como formas de distribución y suministro, tanto medicinal como industrial, y ofrecer una mirada hacia lo que ha pasado por hacer mal uso y manipulación de este gas.

4. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES DEL OXÍGENO.

4.1 Origen del oxígeno.

El átomo de oxígeno fue uno de los primeros en formarse en el proceso de evolución química, sin embargo, la forma diatómica (molecular O₂) tardaría en aparecer porque la mayor parte del oxígeno se encontraba asociado a otros elementos (H, C, N, metales, etc.), y en este estado no era reactivo ni podía ser usado como aceptor final de electrones en las cadenas metabólicas. Las cianobacterias son un grupo de microorganismos procariontes fotosintéticos, cercano a las algas (bajo algunas clasificaciones se encuentran clasificadas como algas verde-azules) por la presencia de pigmentos fotosintéticos clorofílicos que, mediante la acción de la luz catalizan la siguiente reacción:



Esta reacción muestra el origen del oxígeno molecular a partir de la ruptura de las moléculas de agua (proceso de fotosíntesis) y de esta forma el O₂ se fue aportando durante millones de años a la atmósfera, incrementando su concentración hasta cambiar su carácter de reductor a oxidante (Fonturbel, 2004).

4.2 Descubrimiento del oxígeno.

Dentro del marco histórico que envuelve a este elemento, en primera instancia, es atribuido a el descubrimiento a Carl Wilhelm Scheele, un farmacéutico y químico sueco que consiguió producir oxígeno y relató su descubrimiento en sus trabajos recopilados en su libro Tratado químico del agua y del fuego (por su nombre en alemán, *Chemische Abhandlung von der Luft und der Feuer*), que se publicó en 1777, y en el que se describen ciertas características del oxígeno (Ciencia y Tecnología, 2021).

Carl Wilhelm Scheele aisló el oxígeno calentando óxido de mercurio y otras sustancias (Figura 1) lo que provocó la descomposición del óxido de mercurio, en mercurio (Hg) líquido y oxígeno (O₂) gaseoso. Scheele llamó al gas «aire del fuego», porque el gas ayudaba al proceso de la combustión. Sin embargo, la publicación de su único libro *Chemische Abhandlung von der Luft und der Feuer* (Tratado químico del aire y del fuego), en el que describe el nuevo elemento no fue publicado hasta 1777, pese haber sido enviado a su editor en 1775 (Ciencia y Tecnología, 2021).

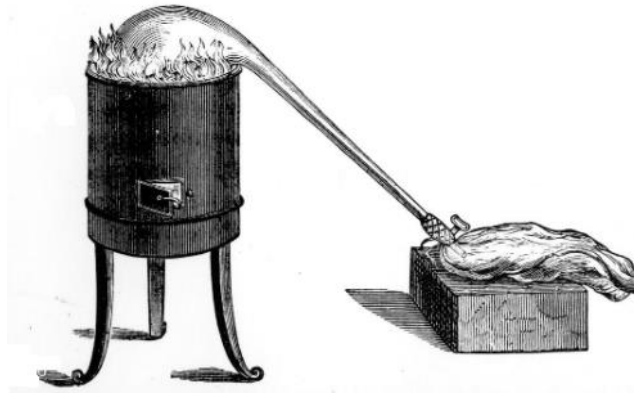
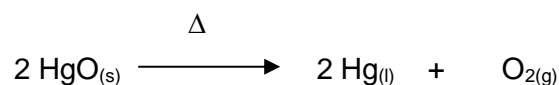


Figura 1. Experimento de Scheele, aparato para recoger oxígeno (GettyImages, 2023).

De igual forma, numerosas publicaciones indican que, el químico inglés Joseph Priestley obtuvo este elemento y realizó la publicación de este hallazgo antes que Scheele, la cual Priestley es reconocido dentro del campo científico (Ciencia y Tecnología, 2021).

El químico Británico Joseph Priestley realizó su experimento al calentar monóxido de mercurio, obtuvo dos vapores, en este proceso, uno se condensó en gotas de mercurio, y el otro elemento, un gas, lo contuvo en un recipiente y realizó algunos ensayos, de los cuales fueron que al introducir una brasa de madera se incendió, y al proporcionar dicho gas a ratones vivos, éstos se volvían muy activos, por lo que decidió inhalar un poco y notó que se sentía muy “ligero y cómodo”. Sin saberlo, Priestley fue la primera persona que usó la mascarilla de oxígeno, su experimento lo podemos entender con la siguiente ecuación:



Priestley al calentar el Monóxido de Mercurio (HgO) que es un sólido de color rojo, se percató que el Mercurio (Hg) se depositaba en el vaso en forma líquida mientras que el oxígeno se colocaba en la parte superior del recipiente en forma de gas, esta reacción de descomposición de este compuesto binario se lleva a cabo por el efecto del calor, lo que llevo a Priestley a descubrir al oxígeno (Ciencia y Tecnología, 2021).

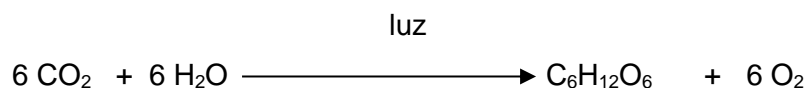
También se percató de que si introducir una vela encendida en el recipiente donde se encontraba el aire, la llama de la vela se quemaba de una forma extraordinariamente vigorosa. Priestley sabía que había descubierto un gas, pero no tenía evidencias reales de ello, experimentó con el nuevo gas, pasó cierto tiempo hasta que descubriera que aquel “aire” que había preparado con el monóxido de mercurio era mejor que el aire común para la respiración. Priestley sabía por sus experimentos que un ratón adulto sobrevivía quince minutos en un recipiente sellado con aire en

su interior, cuando colocaba al ratón en el mismo recipiente lleno con el nuevo “aire”, era capaz de resistir durante media hora (Ciencia y Tecnología, 2021).

Priestley introdujo un ratón adulto en una campana de cristal lleno del aire procedente del mercurio calcinado, su primera hipótesis fue que el ratón no sobreviviría más de quince minutos, el tiempo que tarda en agotarse el aire. Pero su sorpresa fue máxima al comprobar que el ratón se mantuvo consciente una hora y media, resultando que el aire descubierto era tan bueno o mejor que el aire común respirado por animales y humanos. Luego de una serie de experimentos cuidadosamente realizados, dedujo que; en lo que se refería al proceso de la respiración, el nuevo aire era entre cuatro o cinco veces mejor que el aire común. Esto es coherente con el hecho de que el aire contiene un veinte por ciento de oxígeno (Ciencia y Tecnología, 2021).

Joseph Priestley para realizar su experimento primero colocó una vela debajo de una campana esta consume el oxígeno que se encuentra atrapado produciendo CO₂ y vapor de agua, cuando consume todo el oxígeno la vela se apaga.

Priestley se percató que al introducir una planta debajo de la campana la veladora no se apagaba, esto se debe principalmente a que la planta absorbe el CO₂ producido por la reacción de combustión de la vela para producir glucosa, que es su fuente de energía y desecha el oxígeno al medio (fotosíntesis), lo cual podemos entender mediante la siguiente reacción;



Priestley realizó este experimento (figura 2) con un ratón adulto y obtuvo el mismo resultado al introducir la planta debajo de la campana, el individuo puede sobrevivir más tiempo ya que por el proceso de la respiración, el individuo respira el O₂ del medio y desecha CO₂ el cual absorbe la planta para transformarlo en glucosa y oxígeno el cual desecha al medio y esto se vuelve a repetir, a este proceso lo conocemos como el ciclo del oxígeno, sin embargo es un proceso tardado por lo que solo podrá sobrevivir por 10 o 15 min, ya que la planta no podrá hacer el proceso de la fotosíntesis a tal escala que pueda producir el suficiente oxígeno para que el ratón sobreviva debajo de la campana de vidrio (Ciencia y Tecnología, 2021).

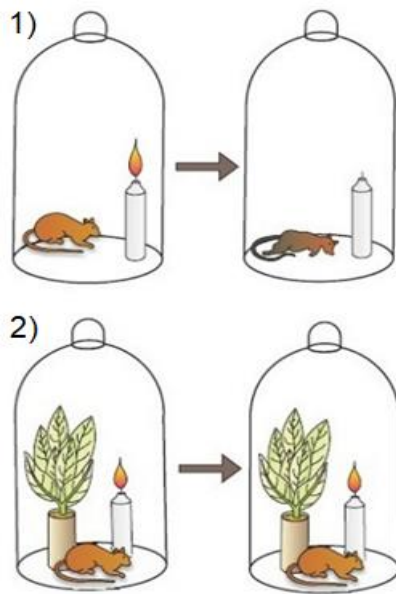


Figura 2. Experimento de Joseph Priestley (Toppr, 2023).

El químico francés Antoine-Laurent de Lavoisier produjo oxígeno a través del calentamiento de unos trozos de metal. Sin embargo, él ya conocía con antelación las investigaciones realizadas por Scheele (Ciencia y Tecnología, 2021).

Fue el primero en publicar un tratado sobre este gas y darle nombre utilizado para este fin, dos raíces griegas -oxys- “ácido” y genes “generator” o “que engendra”, porque creyó que el oxígeno era un constituyente indispensable de los ácidos. Demostró que era un gas elemental realizando sus experimentos clásicos sobre la combustión (Eliana Alfaro, 2013).

En 1774 Lavoisier demostró que el aire es una mezcla de oxígeno y otro gas, nitrógeno, durante doce días y doce noches consecutivas calentó mercurio en un frasco de retorta cuyo cuello curvo terminaba en la parte superior de una campana de cristal volcada sobre un tanque de mercurio (Figura 3) (Edumedia, 2021).

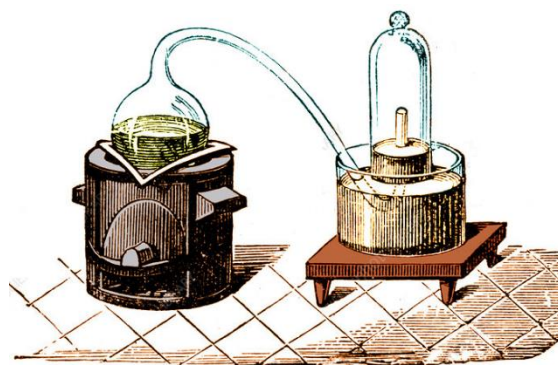
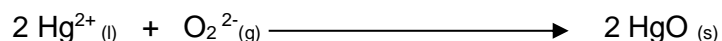


Figura 3. Experimento de Antoine Lavoisier (SCIENCEPHOTOLIBRARY, 2023).

Al segundo día, Lavoisier vio la superficie del mercurio cubierta de manchas rojizas (HgO), que aumentaron durante cinco días, y el nivel en la campana subió. Siguió calentando hasta el duodécimo día; no se produjeron más cambios en la unidad, por lo que la dejó enfriar, el gas que quedaba en el frasco y la campana de cristal apagó una vela encendida; este gas no era respirable: pequeños animales sumergidos en este gas murieron allí. Le dio el nombre en griego “azote” (“a” sin, “zote” vida). Puso el compuesto rojo en una retorta muy pequeña para dejar la menor cantidad de aire posible. Cuando se calentó, recogió oxígeno del tanque de mercurio y encontró mercurio en la retorta; por tanto, el compuesto rojo era una combinación de mercurio y oxígeno, es decir, óxido de mercurio (HgO). Lavoisier pasó por la misma campana el nitrógeno restante del primer experimento y el oxígeno recogido en el segundo; al hacerlo, obtuvo una mezcla que tenía todas las propiedades del aire atmosférico. De este modo, había establecido mediante análisis y síntesis que el aire es una mezcla de oxígeno y nitrógeno, en sus estudios sobre la calcinación de metales descubrió que a lo que le llamaban cal, en realidad era óxido del metal que se somete a combustión lo cual sucede con la siguiente reacción (Edumedia, 2021).

Al calentar un metal este se oxida (pierde electrones), lo que facilita que reaccione con el oxígeno para formar un óxido del metal.



En el caso del experimento de Lavoisier el mercurio (Hg) tiene una valencia de +2 y el oxígeno de -2, el entrecruzamiento de las valencias nos lleva a que el metal que se somete a combustión reacciona con el oxígeno de la atmósfera formando un óxido.

El físico francés Louis-Paul Cailletet, fue el primero en licuar el oxígeno (Figura 4), provocando la compresión brusca del gas, de 300 atm a 1 atm, observando que en el interior de la probeta había una niebla provocada por gotas de oxígeno líquido, todo esto sucedió en diciembre de 1877. Sin embargo, no es hasta 1902 que Friedrich Von Linde, produjo oxígeno y nitrógeno puros, utilizando la rectificación del aire (Barahona Fallas, 2017).

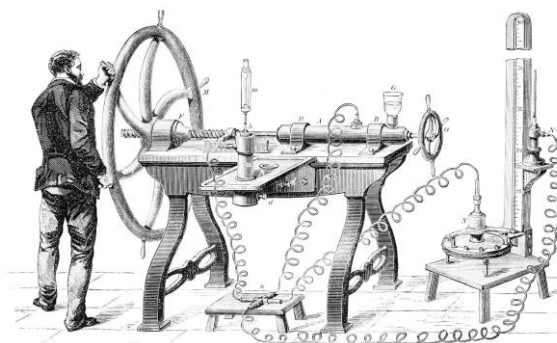


Figura 4. Dispositivo de licuefacción de gas inventado por Louis-Paul Cailletet en 1877 (QUIMICAFACIL, 2021).

Las columnas de rectificación utilizadas inicialmente eran de tipo simple, la cual tenía grandes desventajas, entre ellas, que solamente producen oxígeno puro o nitrógeno del tope que contenía cerca del 7 % de oxígeno, no permitiendo la buena recuperación de ese gas. De esta forma, se obtiene que un tercio del oxígeno contenido en el aire era lanzado nuevamente a la atmósfera, lo que era un desperdicio de energía, con la investigación de nuevos procesos y mejoras de los procesos existentes, el costo del proceso original se ha logrado aumentar, al igual que la efectividad de las plantas (Barahona Fallas, 2017).

Fueron Mendeleiev y Thomas Andrews, quienes abrieron la posibilidad de licuar el aire al introducir en la ciencia el concepto de temperatura crítica. La temperatura crítica es propia de cada sustancia, en donde por encima de la misma, no es posible su licuación por muy altas que sean las presiones. Por lo que, para condensar cualquier gas, deberá hacerse a una temperatura menor a su temperatura crítica. L. Cailletot y P. Pictet, trabajando independientemente, lograron licuar el aire. Pero el aire líquido no pasó de ser una mera curiosidad científica hasta que Dewar inventó sus famosos recipientes “termo” con los que el aire licuado pudo conservarse en tal fase durante mayor tiempo (Figura 5). Esto posibilitó a Linde estudiar con mayor detalle sus propiedades fisicoquímicas, instalando en Alemania para 1895, la primera fábrica para su obtención a gran escala con el objetivo principal de obtener oxígeno a escala industrial ante la necesidad de satisfacer su ascendente demanda, el oxígeno líquido posee un color azul siendo el elemento que le da tal propiedad a los océanos (Sánchez Dirzo, 2012).

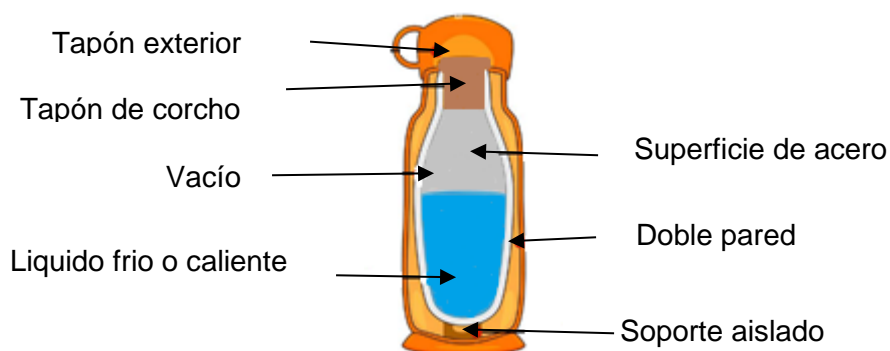


Figura 5. Termo de Dewar, tomado y editada de (Alamy, 2023).

El enfriamiento del aire hasta su condensación y su posterior separación en cada uno de sus componentes se basa en el fenómeno de estrangulación de Joule-Thompson y en la destilación fraccionada respectivamente: ambos a tal punto perfeccionados en la actualidad, que representan dos de los pilares de la industria moderna. La estrangulación de Joule-Thompson de los gases para su enfriamiento es similar al enfriamiento que el aire experimenta cuando es expelido con

fuerza por un soplo desde nuestros pulmones. El aire se estrangula en nuestros labios saliendo a una temperatura menor que la del interior de nuestra boca, la disminución de la temperatura es característica de cada gas dependiendo de las condiciones a las que se encuentra sometido (Sánchez Dirzo, 2012).

4.3 Composición del aire atmosférico.

La composición de la atmósfera ha fascinado a los filósofos de la naturaleza desde tiempos más remotos. Los antiguos griegos consideraban el aire como uno de los cuatro elementos. No fue hasta el siglo XVII que se reconoció al aire como una mezcla de gases.

El químico inglés Robert Boyle (Figura 6), pensó que esto era así cuando escribió en el siglo XVII que el aire era "un confuso agregado de efluvios" (Brimblecombe, 1986).



Figura 6. Robert Boyle (*Planeta de libros México, 2023*)

Aunque más tarde, incluso después de que se hubiera observado que el nitrógeno y el oxígeno eran los componentes principales del aire, la cuestión de comprobar si se trataba de una muestra permanente. El famoso científico inglés Sir Humphrey Davy (1778-1829) (Figura 7), pensó que era un compuesto (Brimblecombe, 1986).

La razón por la que esta creencia sobrevivió tanto tiempo fue que los científicos pensaron que, si no era un compuesto, el oxígeno del gas más pesado debería hundirse por debajo del nitrógeno y, por lo tanto, el oxígeno debería encontrarse en concentraciones altas en el fondo de la atmósfera. Sin embargo, el aire es una mezcla y las razones tradicionales para creer esto son:

- La proporción de oxígeno a nitrógeno varía, sólo ligeramente, de un lugar a otro.
- Si fuera un compuesto, la fórmula sería $N_{15}O_4$, lo que parece poco probable.
- Las propiedades físicas del aire son idénticas a las de la mezcla apropiada de nitrógeno y oxígeno.
- Es posible separar el nitrógeno y el oxígeno.
- No hay cambio de volumen ni liberación de calor al mezclar oxígeno y nitrógeno (Brimblecombe, 1986)



Figura 7. Sir Humphry Davy (*Educación Química, 2023*)

Henry Cavendish (Figura 8), realizó análisis precisos del aire en 1780, lo notable de sus minuciosos análisis fue que por mucho que intentara combinar químicamente todo el oxígeno y el nitrógeno del aire, siempre quedaba una pequeña fracción inerte, afirmó que el aire era una composición de oxígeno y nitrógeno en una relación 1:4, así como que el agua no era un elemento si no un compuesto, fue el primero en distinguir la presencia del dióxido de carbono e hidrógeno, para con eso terminar con la teoría del flogisto (Brimblecombe, 1986)



Figura 8. Henry Cavendish (Ecured, 2021)

La tabla 1 enumera las concentraciones de los principales componentes de la atmósfera, estos son los gases relativamente persistentes que actúan como la matriz de fondo dentro de la cual tiene lugar la intrincada química de los componentes traza atmosféricos (Brimblecombe, 1986).

Tabla 1. Composición del aire seco cerca del nivel del mar por volumen (Brimblecombe, 1986).

GAS	COMPOSICIÓN
Nitrógeno	78.08 %
Oxígeno	20.95 %
Argón	0.93 %
Dióxido de carbono	0.03 %
Neón	0.0018 %
Helio	0.0005 %
Metano	0.00016 %
Criptón	0.000114 %
Hidrógeno	0.00006 %
Óxido nitroso	0.00003 %
Xenón	0.0000087 %

4.4 ¿Qué es el oxígeno?

El oxígeno es un elemento químico de aspecto incoloro con número atómico 8 (Figura 9), su símbolo es O y pertenece al grupo de los no metales y su estado habitual en la naturaleza es gaseoso (Gutiérrez Ríos, 1978).



Figura 9. Símbolo del oxígeno (Pinterest, 2021).

Es el elemento más abundante en la Tierra representando el 49.5 % de la corteza terrestre y participa de manera importante en el ciclo energético de los seres vivos, siendo un gas vital, por ser esencial en la respiración celular de los organismos aeróbicos, a presión atmosférica y temperaturas inferiores a 90.15 °K, es un líquido ligeramente azulado, un poco más pesado que el agua. Es un oxidante muy energético y se combina con casi todos los elementos (salvo gases inertes), produciendo la oxidación (corrosión), reacción que varía en intensidad con la temperatura y la combustión (en presencia de calor y combustible). El oxígeno existe de forma natural en la atmósfera, en el aire que se respira. Este gas constituye más de un quinto de la atmósfera (21 % en volumen), el resto se compone por nitrógeno, otros gases, y vapor de agua (Tudela Gallardo, 2019).

4.5 Propiedades del oxígeno.

La mayor cantidad de oxígeno presente en la atmósfera se encuentra como oxígeno gas (O_2) tiene una configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^4$, aunque también se encuentra en forma de ozono (O_3) en una proporción mucho menor, el cual se encuentra en mayor proporción en la estratosfera. El O_2 comprende el 20.947 % en volumen del aire. El oxígeno molecular es un gas en condiciones normales (20 °C y 1 atm) incoloro e inodoro. Tiene una masa molecular de 31.998 g/mol, temperatura de fusión de 55.15 °K y punto de ebullición de 90.19 °K. Es un compuesto bastante reactivo, ya que tiene facilidad para generar oxidaciones. Según el compuesto al que oxide, puede ocurrir que la oxidación sea exotérmica y rápida produciendo lo que se conoce como combustión, por lo que se le clasifica como un comburente (Tudela Gallardo, 2019).

Una de las propiedades de los elementos no metales, como el oxígeno, es por ejemplo que son malos conductores de calor y de electricidad. El oxígeno, al igual que los demás elementos no metales, no tiene brillo y no es maleable, el estado del oxígeno en su forma natural es gaseoso (paramagnético) (Gutiérrez Ríos, 1978).

4.6 Toxicidad del oxígeno.

El oxígeno es indispensable para la vida de los organismos aerobios, sin embargo, en altas concentraciones o en ciertas condiciones diferentes a la concentración normal llega a ser tóxico, a este hecho se le conoce como la paradoja del oxígeno, siendo una de las paradojas más grandes ya que los seres vivos requieren el oxígeno para transformar la glucosa en energía, pero un efecto secundario del metabolismo aerobio es el envejecimiento (Cárdenas Rodríguez, 2005).

La toxicidad del oxígeno se puede explicar por la formación de las especies reactivas del oxígeno (ERO), dichas especies son más reactivas que el oxígeno en estado basal de triplete, las principales especies son:

- A. Las que se producen por la ruptura o excitación del oxígeno (oxígeno atómico, ozono y oxígeno singulete).
- B. Las parcialmente reducidas (superóxido, peróxido de hidrógeno y radical hidroxilo)
(Cárdenas Rodríguez, 2005).

La presencia de las ERO ha sido principalmente asociada al envejecimiento y daños ocasionados por la isquemia-reperfusión y a una amplia diversidad de estados patológicos como la enfermedad de Alzheimer, artritis reumatoide, hipertensión, carcinogénesis, entre otras (Cárdenas Rodríguez, 2005).

4.7 Especies reactivas del oxígeno (ERO); estructura electrónica y formación.

El oxígeno puede formar diferentes ERO, las cuales en concentraciones excesivas están asociadas a muchos desórdenes patológicos (Cárdenas Rodríguez, 2005).

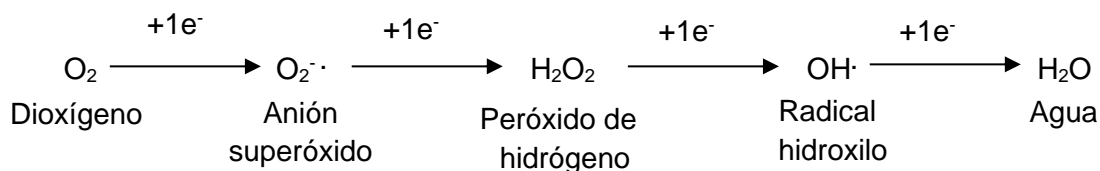
4.7.1 Estructura electrónica del oxígeno y del oxígeno singulete.

La reactividad del oxígeno molecular o dióxígeno (átomos de oxígeno unidos por un enlace covalente), depende de su estructura electrónica, una de las características del oxígeno es que

tiene dos electrones desapareados ocupando cada uno de ellos, dos diferentes orbitales moleculares externos (en el orbital π^* - pi antienlazante), a esta estructura la conocemos como estado basal o estado triplete, significa que el oxígeno es un birradical, ya que los radicales libres son usualmente más reactivos tratando de encontrar un electrón con quien establecer un par y por definición un radical libre tiene al menos un electrón desapareado (Cárdenas Rodríguez, 2005).

Sin embargo, el dioxígeno, posee estos dos electrones en giro paralelo y esto dificulta tomar dos electrones libres con giro antiparalelo, por ello solo puede recibir estos electrones de uno en uno para cada orbital molecular externo, esto explica por qué en estado basal y a temperatura ambiente el oxígeno reacciona muy poco, a pesar de ser birradical (Cárdenas Rodríguez, 2005).

A la constante adición de electrones a la molécula de oxígeno se le conoce como reducción univalente y esto produce especies parcialmente reducidas de oxígeno como se muestra en la siguiente reacción:



Cuando uno de los electrones desapareados del oxígeno, absorbe energía e invierte su rotación, se forma el oxígeno singulete ($^1\text{O}_2$), existen dos formas de oxígeno singulete; la forma sigma (Σ) que es un radical libre, debido a que conserva los dos electrones desapareados en los orbitales moleculares externos $2\pi^*$, cada electrón en un orbital como en el caso de la molécula del dioxígeno, la diferencia se da debido a que un electrón tiene giro paralelo y el otro electrón tiene giro antiparalelo y la forma delta (Δ), también tiene dos electrones aunque en este caso están apareados en un solo orbital $2\pi^*$, por lo que no se considera un radical libre ya que no tienen ningún electrón desapareado, como se muestra en la tabla 2 (Cárdenas Rodríguez, 2005).

El oxígeno singulete en su forma Σ posee una energía de 37.5 Kcal, mientras que su forma Δ posee una energía de 22.4 kcal, la forma Σ es muy inestable y por esto en los sistemas biológicos sólo tiene se tiene importancia la segunda forma (Δ) (Cárdenas Rodríguez, 2005).

Tabla 2. Configuración electrónica de algunas de las moléculas del oxígeno diatómico en el orbital $2\pi^*$ (Cárdenas Rodríguez, 2005).

ESPECIE DE MOLECULA DE OXÍGENO	CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA EN EL ORBITAL $2\pi^*$
Oxígeno triplete (O_2)	$\underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow}$
Oxígeno singulete (1O_2)	
<ul style="list-style-type: none"> • Forma 1Σ 	$\underline{\uparrow} \quad \underline{\downarrow}$
<ul style="list-style-type: none"> • Forma 1Δ 	$\underline{\uparrow} \quad \underline{\downarrow}$
Superóxido (O_2^-)	$\underline{\uparrow\downarrow} \quad \underline{\quad}$

4.7.2 Formación de las especies reactivas de oxígeno (ERO).

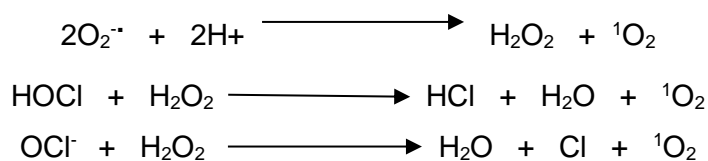
Las especies reactivas de oxígeno (ERO) que se muestran en la tabla 3, es un término que engloba no solo a los radicales libres derivados del oxígeno, sino también a aquellos no radicales que resultan de la reducción molecular del oxígeno, que son muy reactivos, por ejemplo, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ácido hipocloroso (HOCl) (Cacua-Madero, 2013).

Tabla 3. Especies reactivas de oxígeno (ERO) (Cárdenas Rodríguez, 2005).

RADICALES	NO-RADICALES
Superóxido (O_2^-)	Oxígeno singulete (1O_2) forma 1Δ
Hidroxilo (OH^\cdot)	Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)
Peroxilo (RO_2^\cdot)	Ozono (O_3)
Alcoxilo (RO^\cdot)	Anión peroxinitrito ($ONOO^-$)
Hidroperoxilo (HO_2^\cdot)	Ácido hipocloroso (HOCl)
	Ácido hipobromoso (HOBr)

El oxígeno singulete existe en dos formas la sigma Σ y la delta Δ , la Σ se forma por la inversión en el espín de uno de los electrones desapareados de unos de los orbitales externos de la molécula de oxígeno. De esta misma forma, la formación de oxígeno singulete es llevada a cabo por fagocitos activados, que son células que forman parte del sistema inmunológico de los seres vivos y que son estimuladas cuando ya existe o hay posibilidad de daño a las células que se podría dar por inhalación o consumo de compuestos tóxicos o colonización bacteriana, pues liberan enzimas

tal como proteasas y ERO para combatir este daño. La producción de esta ERO se da de la siguiente manera;



(Cárdenas Rodríguez, 2005).

4.8 Formas alotrópicas del oxígeno.

El oxígeno existe en dos formas alotrópicas: el dióxígeno (oxígeno molecular) y el menos abundante trióxígeno, comúnmente llamado ozono (Rayner-Canham, 2000).

Dioxígeno (oxígeno molecular) O_2 (Figura 10), es uno de los gases más importantes de la tierra, constituye el 21 % de la atmósfera, 89% del peso del agua del mar y al menos el 47% de la corteza terrestre, puesto que tiene una masa molar baja y forma una molécula no polar, tiene puntos de fusión y de ebullición muy bajos de 54.36 °K y 90.19 °K respectivamente, su configuración electrónica es $1s^2 2s^2 2p^2$ y está unido por un enlace covalente. El gas no es inflamable, pero sí ayuda a mantener la reacción de combustión, casi todos los elementos reaccionan con el oxígeno a temperatura ambiente o cuando se calientan. Las principales excepciones son los metales "nobles", como el platino, y los gases nobles. Para que ocurra una reacción, a menudo es importante el estado de división del reactivo. Por ejemplo, metales muy finamente pulverizados, como el hierro, zinc e incluso plomo, se incendian en el aire a temperatura ambiente, si se encuentran finamente pulverizados, ya que las partículas se dispersan rápidamente en el ambiente y tienen propiedades pirofóricas, término que se le da por su capacidad para incendiarse (Rayner-Canham, 2000).

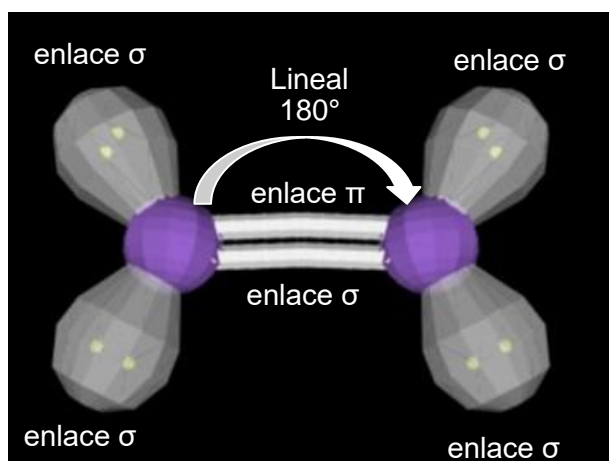


Figura 10. Estructura molecular en 3D del dióxígeno.

Trioxígeno (ozono) O_3 (Figura 11), este alótropo del oxígeno termodinámicamente inestable es un gas diamagnético con olor penetrante, se puede detectar el olor "metálico" del ozono en concentraciones de 0.01 ppm, el gas es extremadamente tóxico; la concentración máxima permitida para una exposición prolongada es de 0.1 ppm (Rayner-Canham, 2000).

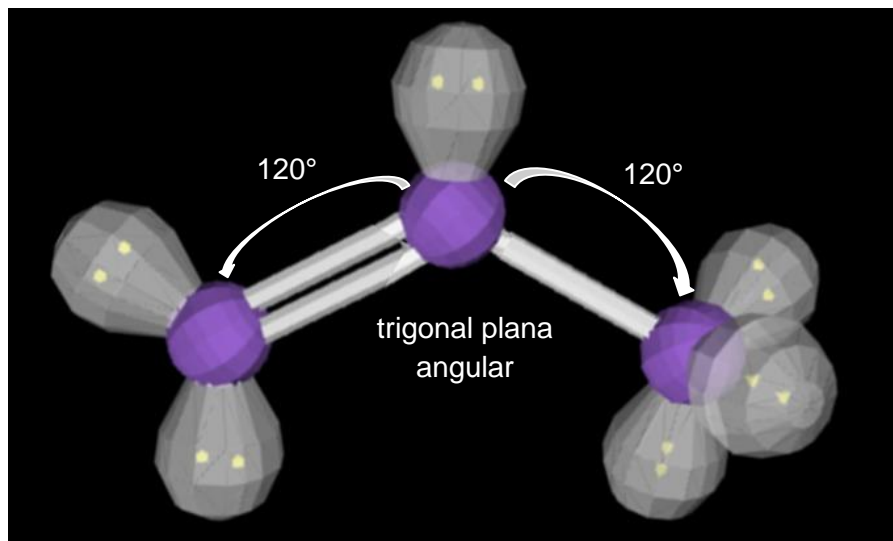
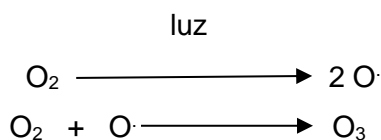


Figura 11. Estructura molecular en 3D del ozono.

El ozono (O_3) es un gas triatómico de color azul pálido y constituye una capa protectora de la radiación solar en la atmósfera superior, es producido por la fotodisociación de la molécula de oxígeno lo que genera dos radicales de oxígeno, los cuales posteriormente reaccionan con el oxígeno molecular (Cárdenas Rodríguez, 2005).



Sin embargo, el ser humano también está expuesto al O_3 pues éste se puede formar por las reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos. Ya que es un poderoso agente oxidante puede producir inflamación y daño pulmonar (Cárdenas Rodríguez, 2005).

El Protocolo de Montreal es un acuerdo histórico que ha reducido con éxito la producción, el consumo y las emisiones mundiales de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) (Velders, 2007).

Las SAO son sustancias químicas que tienen el potencial de reaccionar con las moléculas de ozono en la estratósfera para formar otros compuestos. Son básicamente hidrocarburos clorados, fluorados o bromados. En 1988, México fue uno de los primeros países en firmarlo y ratificarlo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

4.9 Principales compuestos contaminantes que se forman con el oxígeno.

4.9.1 Monóxido de carbono (CO).

El CO es un gas que se produce a partir de la combustión a bajas concentraciones de oxígeno, lo que se denomina combustión incompleta. La bibliografía indica que el 86 % de las emisiones proviene del transporte, seguida con un 6 % por quema de combustible en la industria y 3 % por procesos industriales; el 4 % restante se origina en quemas y otros procesos no identificados. En forma natural se genera a partir de la oxidación de metano, comúnmente producida por la descomposición de materia orgánica (Intendencia Montevideo, 2021).

El CO puede causar efectos adversos en la salud, ya que compite con el O₂ en el torrente sanguíneo, lo que reduce la capacidad de la sangre de transportar el oxígeno a los diferentes órganos. Las personas vulnerables, particularmente las que tienen problemas cardíacos, pueden ver disminuida su capacidad de oxigenación. Sin embargo, las concentraciones de CO raras veces exceden los límites establecidos para la preservación de la salud, incluso en grandes ciudades muy urbanizadas (Intendencia Montevideo, 2021).

4.9.2 Óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) describen una mezcla de dos gases: óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Son gases inorgánicos formados por la combinación de oxígeno con el nitrógeno del aire. El NO es producido en cantidades mucho mayores, pero se oxida rápidamente a NO₂ en la atmósfera. La emisión de este gas se debe fundamentalmente al transporte, a la combustión para generación de energía, mecánica y eléctrica y a los procesos industriales. Naturalmente son originados por descomposición bacteriana, incendios forestales y actividad volcánica (Intendencia Montevideo, 2021).

En el 2020 la evidencia científica relaciona la exposición de corto plazo de los óxidos de nitrógeno con efectos respiratorios, se ha encontrado que la concentración de NO₂ en las cercanías de vías respiratorias donde transita el compuesto de forma considerable, por lo que es importante tener en cuenta el efecto en individuos vulnerables. El NO₂ causa efectos perjudiciales en los bronquios,

puede irritar los pulmones y bajar la resistencia a infecciones respiratorias. Contribuye a la formación de la lluvia ácida, aumenta la concentración de nitratos en suelos y aguas superficiales. Estos óxidos reaccionan con otras partículas en el ambiente y se integran al material particulado; en presencia de compuestos orgánicos volátiles y radiación solar reaccionan generando ozono (O_3) que también puede tener efectos adversos sobre el sistema respiratorio de la población sensible (Intendencia Montevideo, 2021).

4.9.3 Dióxido de azufre (SO_2).

El SO_2 es un gas muy reactivo en la atmósfera, casi todos los combustibles fósiles tienen rastros de azufre en su composición, el 98 % del SO_2 que se emite a la atmósfera proviene fundamentalmente de la quema de combustibles fósiles, tanto en la industria como en la generación de energía eléctrica, seguido por las emisiones asociadas a los procesos industriales y el transporte (Intendencia Montevideo, 2021).

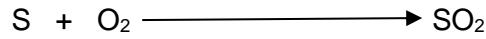
En el año 2020 la Organización Mundial de la Salud estableció una correlación directa entre los efectos negativos sobre el sistema respiratorio y la concentración de SO_2 en el aire, mencionando especialmente la aparición de broncoespasmos y efectos en asmáticos. El SO_2 se utiliza como indicador de la familia de los óxidos azufrados que se denominan genéricamente SO_x , su presencia en la atmósfera es responsable directamente de la lluvia ácida (Intendencia Montevideo, 2021).

Los SO_x son solubles en agua y al hidratarse forman ácidos irritantes, que penetran al organismo por la vía aérea y se asocian a la disminución de la función pulmonar, el aumento de su concentración en el ambiente se ha relacionado con un incremento en la mortalidad, agravación de enfermedades cardiacas, pulmonares y aumento de la incidencia de enfermedades respiratorias agudas (Vallejo, 2022).

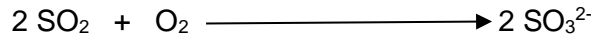
En áreas urbanas cuando la contaminación por dióxido de azufre se asocia a contaminación por dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono puede tener consecuencias fatales. En Londres en 1952 el complejo de óxido de azufre y partículas conocido como la (niebla negra), fue el responsable de un aumento de la mortalidad especialmente de personas con enfermedad cardiaca o respiratoria y en niños pequeños (Vallejo, 2022).

4.9.3.1 Reacciones del oxígeno con azufre SO_x .

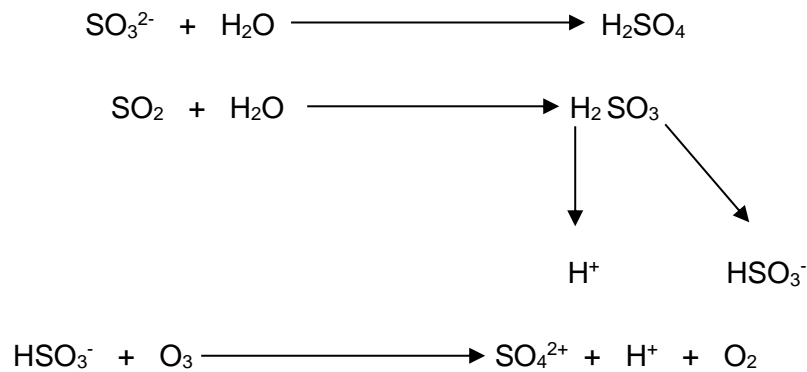
La formación del dióxido de azufre se da a causa de la oxidación del azufre debido a la incineración de carbón dado que este es muy rico en azufre de la siguiente manera:



La oxidación del azufre ocurre directamente en la llama por lo tanto el SO_2 es descargado a la atmósfera desde el humo, a medida que es desplazado por el viento a temperatura ambiente este se oxida a SO_3^{2-} (Salazar Ávila, 2018).



Es un gas incoloro e higroscópico que reacciona con la humedad del ambiente y puede oxidarse para formar ácido sulfúrico y ácido sulfuroso, que posteriormente forma parte de la lluvia ácida (Salazar Ávila, 2018).



Cabe mencionar que el SO_2 es el compuesto principal en la formación de partículas finas en la atmósfera de lluvia ácida, así como de aerosoles (Salazar Ávila, 2018).

4.9.3.2 Aerosoles de SO_2 .

Las emisiones de gases azufrados afectan el balance radiactivo, ya que éstos se transforman a aerosoles sulfato que causan:

- Dispersión de luz solar hacia el espacio y reduciendo así, la radiación que llega al planeta.
- Aumentan la cantidad de nubes como núcleos de condensación y consecuentemente alteran las características físicas de las nubes.
- Afectan la composición química de la atmósfera (Salazar Ávila, 2018).

El tiempo promedio que permanecen en la atmósfera es de alrededor de 3 a 5 días, la exposición a sulfatos y ácidos derivados del SO_2 es muy dañina para la salud de las personas, debido a que estos compuestos entran en el sistema circulatorio directamente a través de las vías respiratorias.

La contaminación del aire por el SO_2 tiene los siguientes efectos en los seres humanos: turbidez corneal, dificultad para respirar, inflamación de las vías respiratorias, irritación de ojos, daños en la garganta, alteraciones psíquicas, edema pulmonar, insuficiencia cardíaca, colapso circulatorio (Gracia Gúzman, 2023).

4.9.4 Principales elementos de la tabla periódica que se combinan con el oxígeno.

El oxígeno puede formar enlaces covalentes coordinados, sea como ácido de Lewis o base de Lewis, los primeros son muy poco comunes. En cambio, el oxígeno reacciona fácilmente como base de Lewis, por ejemplo, en la unión de moléculas de agua a iones de metales de transición a través de un par solitario en el oxígeno. Los metales en sus estados de oxidación más bajos forman óxidos iónicos y básicos, estos óxidos de metales débilmente electropositivos como aluminio, zinc y estaño son anfóteros, es decir, reaccionan tanto con ácidos como con bases. El cambio gradual en el comportamiento de los óxidos al aumentar el número de oxidación se puede demostrar con ejemplos tomados de los metales de transición. Si el metal está en estado de oxidación 2 y el oxígeno en su estado de oxidación -2, el óxido es básico (y a veces reductor). Los óxidos anfóteros tienen las propiedades de actuar como base o como ácido. Los óxidos de los no metales siempre tienen enlaces covalentes. Los que se forman con el elemento en un estado de oxidación bajo tienden a ser neutros, mientras que los que se forman con el elemento en estados de oxidación más altos tienden a ser ácidos (Rayner-Canham, 2000).

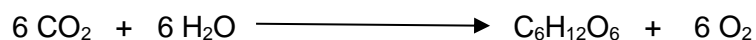
5. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE OXÍGENO.

La mayoría de los procesos de obtención de oxígeno utilizan el aire atmosférico como materia prima, se encuentra libre y fácilmente disponible en la atmósfera, pero requiere de una gran cantidad de energía para conseguir separar el aire en sus componentes. Los métodos que se describen a continuación son los empleados comúnmente, aunque existen otros, como la electrólisis del agua, que no emplean el aire como materia prima, aunque su uso es más para producir hidrógeno como producto principal y oxígeno como producto secundario (Tudela Gallardo, 2019).

5.1 Producción natural de oxígeno mediante la fotosíntesis.

Se considera como una forma de producción natural en la que se produce O₂ en el ambiente durante la fotosíntesis, las plantas toman dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) del aire y del suelo, dentro de la célula de la planta, el agua se oxida (pierde electrones), mientras que el dióxido de carbono se reduce (gana electrones), esto lleva a que el agua se separe en oxígeno e hidrógeno y el dióxido de carbono se transforme en glucosa, después la planta libera el oxígeno al medio ambiente y almacena las moléculas de glucosa como fuente de energía (Fonturbel, 2004).

La reacción general detrás del proceso de la fotosíntesis se muestra con la siguiente ecuación:



El oxígeno liberado es utilizado en el proceso de respiración humana y de otros animales que necesitan oxígeno para poder vivir, cuando los humanos respiramos liberamos dióxido de carbono en el aire que volverá a ser utilizado por las plantas para producir su alimento y el ciclo comienza de nuevo, este se conoce como el ciclo del oxígeno (Fonturbel, 2004).

Entre el 50 y 85 % del oxígeno producido en el planeta proviene de las algas y el fitoplancton, que se pueden clasificar en microalgas y macroalgas, ambos son organismos fotosintéticos que viven en océanos, ríos y lagos (Fonturbel, 2004).

Estos organismos usan reacciones fotosintéticas de luz y oscuridad para convertir compuestos inorgánicos y luz en materia orgánica, al igual que las plantas las algas producen oxígeno mediante la utilización de energía solar para extraer protones y electrones del agua, mediante la fijación del CO₂ para producir glucosa (Fonturbel, 2004).

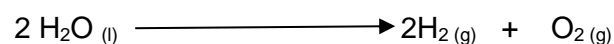
5.2 Métodos industriales de producción de oxígeno.

La mayoría de los métodos de producción de oxígeno requieren de la separación del aire en sus componentes para generar oxígeno de diferentes purzas, caudales y presiones. Separación criogénica, adsorción por cambio de presión, la tecnología de membranas son los métodos más comunes para producir oxígeno, están otros como la electrolisis del agua que es más usada en la producción de hidrogeno y genera oxígeno como un producto secundario o los concentradores de oxígeno que tuvieron mucha relevancia durante la pandemia COVID-19 (Aljaghoub, 2023).

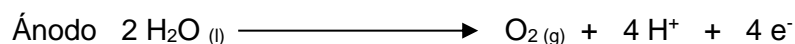
5.2.1 Producción de oxígeno mediante la electrólisis de agua.

La electrólisis es el proceso que consiste en la separación de la molécula del agua, en oxígeno e hidrógeno por medio de una corriente eléctrica, para generar como producto principal hidrógeno y como producto secundario oxígeno, éste se puede producir y recolectar a través de la reacción anódica o catódica que ocurre en el electrolizador. La celda, unidad básica para la electrólisis del agua (Figura 12) consiste en un ánodo, un cátodo, un separador o membrana, una fuente de alimentación y un electrolito que puede ser NaOH o KOH esto ya que su índice de ataque a los materiales que construyen la celda es menor que el de los ácidos, los componentes más importantes de las celdas de electrólisis son los electrodos (Herraiz Cardona, 2012).

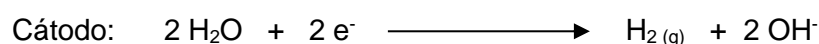
La reacción global que ocurre dentro de la celda electrolítica es la siguiente:



En el ánodo (+) las moléculas de agua se descomponen mediante una reacción de oxidación con lo cual obtenemos liberación de oxígeno, electrones que fluyen por el circuito y también iones de carga positiva (protones H^+) que se transportan a través del electrolito, como se muestra en la siguiente reacción;



En el cátodo (-) ocurre una reacción de reducción de protones que en combinación con los electrones del circuito se genera hidrógeno molecular que es liberado en forma de gas, como se muestra en la siguiente reacción;



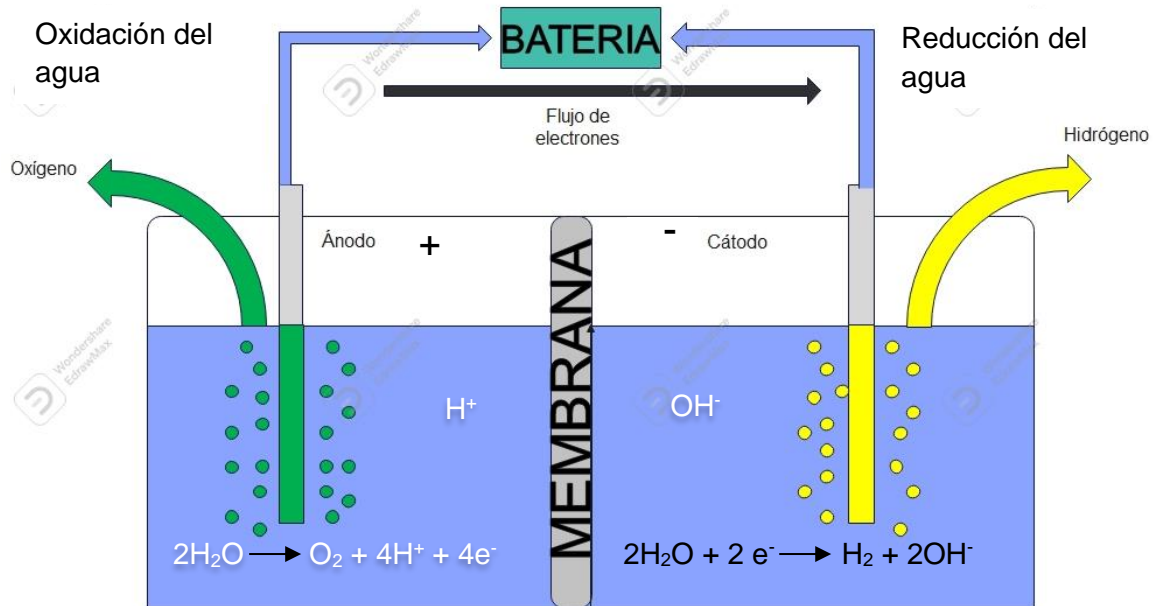


Figura 12. Esquema de un sistema típico de electrólisis del agua, tomada y reeditada de (Herraiz Cardona, 2012).

El método de electrólisis consume enormes cantidades de energía, aproximadamente 50 KW/h por cada kg de hidrogeno tiene como producto el hidrógeno y el oxígeno, siendo el método primario de obtención de hidrógeno (Eliana Alfaro, 2013).

La electrólisis del agua consiste en descomponer el agua en dos moléculas de hidrógeno (H₂) y una de oxígeno (O₂), a través de una corriente eléctrica continua, la cual se suministra por medio de una fuente de alimentación, ya sea una pila o batería y que se conecta a través de electrodos al agua. Podemos entender a la electrólisis como un proceso de separación por medio de la electricidad. Este proceso se llevó a cabo en el año 1800 por dos químicos británicos, justo después de que se inventara la primera batería eléctrica, la pila voltaica, muchos años antes habían logrado realizar la electrólisis del agua gracias a una máquina electrostática, pero no pudieron interpretar la reacción observada (Herraiz Cardona, 2012).

La electrólisis del agua es utilizada en muchos sectores laborales, aunque sobre todo se utiliza en el sector de la industria metalúrgica, alimentaria y energética. El motivo principal por el que se realiza la electrólisis es para utilizar el hidrógeno que se separa como combustible, el 5 % del hidrógeno gaseoso producido en el mundo se genera a través de este proceso (Herraiz Cardona, 2012).

Para realizar este proceso es necesario que se cumplan dos principales factores:

- El agua no deberá encontrarse en estado puro ya que su conductividad es baja, por lo que tiene que presentar concentraciones de sales u otros minerales.
- Utilizar corriente directa durante el proceso (Herraiz Cardona, 2012).

El proceso de la electrólisis del agua lo podemos entender con el diagrama de proceso ilustrado en la Figura (13); como primer paso el agua se toma del tanque donde se encuentra resguardada, se hace circular por medio de una bomba de alimentación, para posteriormente calentarla en un intercambiador de calor y almacenarla en un tanque de agua caliente.

Después se hace llegar a la membrana (que puede ser de electrolito alcalino, tipo PEM o de óxido sólido, dependiendo de la producción y características del fabricante), donde se hará la separación de los gases hidrógeno y oxígeno del agua por medio de una corriente eléctrica, éste último se separa y almacena directamente después de ser separado en la membrana en el caso del hidrógeno, el gas va a otro tanque donde se separa de la pequeña fracción de agua con la que pudiera estar combinado, después es almacenado en tanque de alta presión.

La energía es suministrada a la membrana por medio del transformador para después pasar por el rectificador y suministrarse de manera continua a la celda electrolítica.

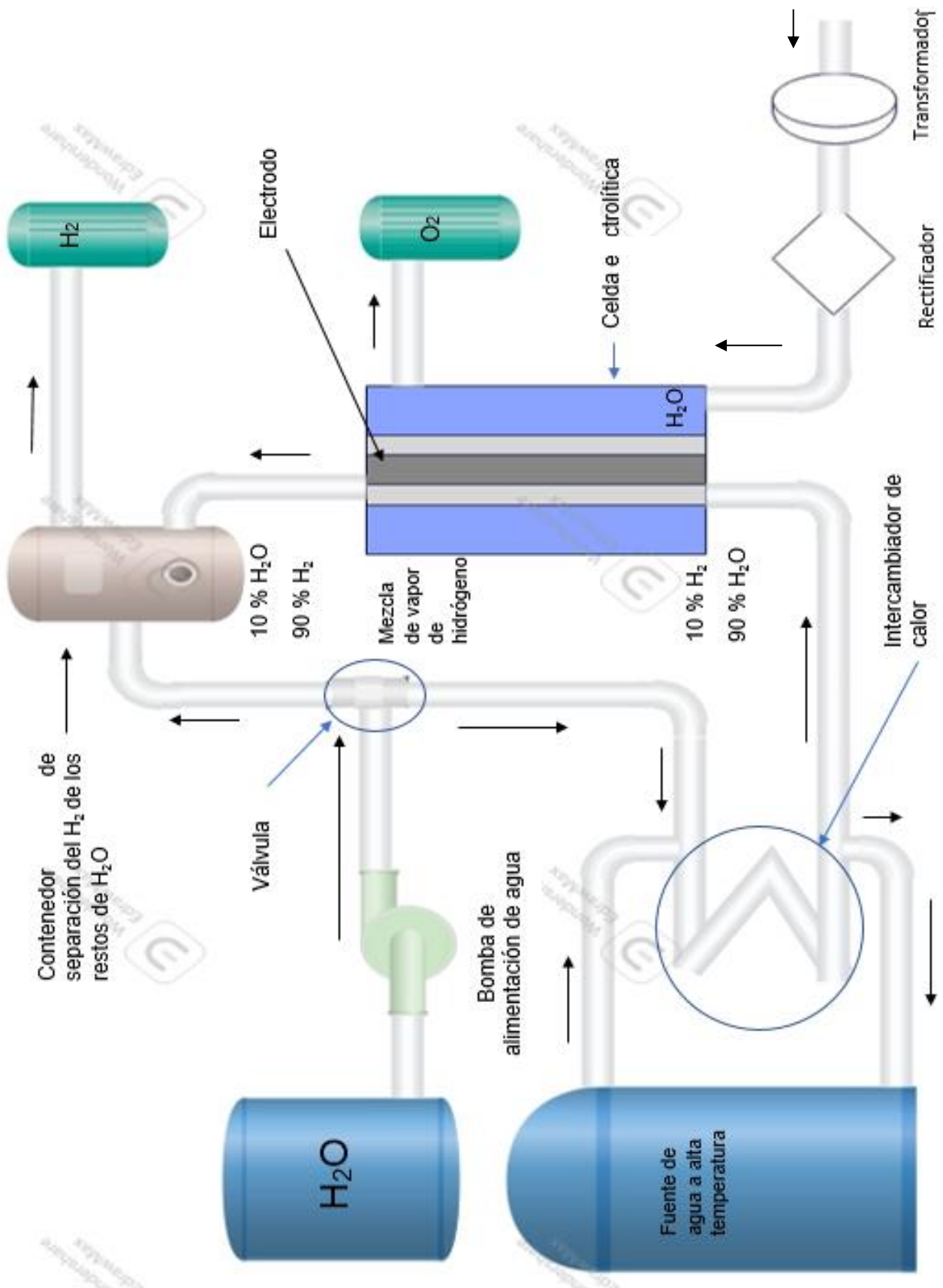


Figura 13. Diagrama de proceso de la electrólisis (Kumar, 2022).

5.2.1.1 Principales tipos de electrolizadores.

La tecnología de electrolizadores nos brinda tres tipos según el electrolito que utilizan, dos de los cuales ya se aplican comercialmente, para la generación de hidrógeno, los electrolizadores alcalinos (EA) y los de membrana polimérica (PEM), el tercer tipo es un electrolizador que funciona con un electrolito a base de óxidos sólidos (EOS). Sin embargo, aún se encuentra en desarrollo ya que su finalidad es operar a gran escala y altas temperaturas, estos electrolizadores tienen varias diferencias tecnológicas pero el resultado es el mismo, obtener un volumen de oxígeno por dos de hidrógeno (Herraiz Cardona, 2012).

Los componentes básicos de un electrolizador (Figura 13), son comunes para todos los sistemas de electrólisis, dependiendo del electrolito utilizando los electrolizadores pueden clasificarse principalmente en: electrolizadores alcalinos, electrolizadores de membrana de intercambio protónico (tipo PEM, por sus siglas en inglés, proton exchange membrane) y electrolizadores de óxido sólido, son los sistemas de electrólisis de agua más utilizados (Herraiz Cardona, 2012).

El electrolizador alcalino (EA) y de intercambio de protones (PEM) generalmente funcionan a bajas temperaturas de hasta 663.15 K, mientras que el electrolizador óxido sólido (EOS) funcionan a altas temperaturas entre 973.15 y 1173.15 K, PEM emplea platino como catalizador de cátodo e iridio/rutenio como catalizador de ánodo lo que la convierte en la tecnología de electrólisis de agua más costosa.

Sin embargo, PEM no es el más eficiente ya que arroja una eficiencia del 80 %, mientras que EA Y EOS muestran una eficiencia del 60 % y 100 %, respectivamente, la generación de oxígeno a través de la electrólisis es una tecnología madura y está cobrando gran atractivo a medida que la investigación y las aplicaciones se orientan hacia la utilización del hidrógeno como combustible del futuro (Aljaghoub, 2023).

5.2.1.2 Electrolizadores alcalinos.

La electrólisis alcalina del agua se presenta como el estándar actual para la electrólisis a gran escala. El electrolito empleado es una disolución acuosa de una base fuerte como el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio en una concentración de 25 a 30 % a 353.15 K. Este tipo de electrolito es apropiado porque presenta conductividad iónica, no sufre descomposición química al voltaje de operación, por tanto, no afecta a la eficiencia de la electrólisis y soporta las variaciones de pH que resultan de cambios en la concentración protónica sobre los electrodos durante el

proceso, en este tipo de electrólisis se lleva a cabo la transferencia de iones OH^- utilizando densidades de corriente de 0.2 a 0.4 A/cm^2 , una gran característica que tiene es que no usan metales preciosos como catalizadores y tienen buena eficiencia aun usando catalizadores más baratos como el níquel, los gases que se obtienen alcanzan purzas de 99.8 % para el hidrógeno y de 99.2 % para el caso del oxígeno, aunque para algunas aplicaciones industriales y de laboratorio se requieran purzas del 99.9 % (Figura 14) (Herraiz Cardona, 2012).

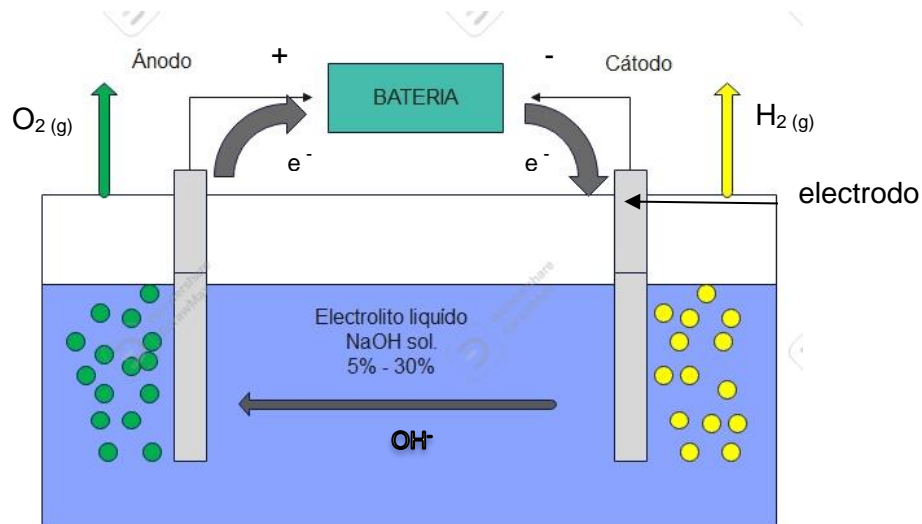
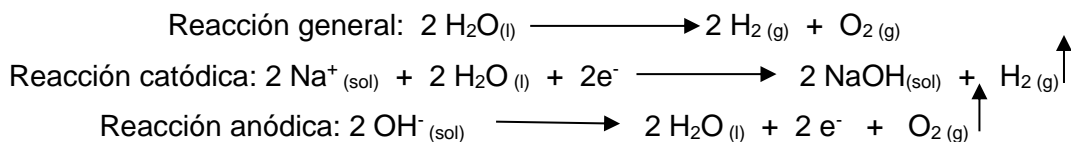


Figura 14. Modelo del electrolizador alcalino, tomada y reeditada de (Moreno Ruiz, 2009).



5.2.1.3 Electrolizadores de membrana de intercambio protónico (tipo PEM).

El desarrollo de los electrolizadores tipo PEM utiliza membranas poliméricas capaces de conducir iones la cual no es conductora de electricidad, en los electrolizadores tipo PEM el electrolito alcalino es remplazado por una membrana de intercambio de iones, que hace la función de separador y de electrolito participando de forma activa en el proceso de la disociación de la molécula del agua (Figura 15). Este tipo de electrolitos sólidos operan generalmente en un medio ácido transportando protones H^+ , tiene un espesor entre 50 a 200 μm , por estas dimensiones del electrolito su construcción es más sencilla que un electrolizador alcalino, su respuesta es más rápida pues ya no tiene resistencia intrínseca de un electrolito líquido. En los años 50, investigadores de General Electric Corporation (GE) desarrollaron celdas de combustible empleando un electrolito de poliestireno sulfonado. En 1966 se desarrollaron celdas de combustible que empleaban membranas muy superiores, las Nafion de DuPont, para proyectos

especiales de la NASA. En 1973 GE desarrolló los electrolizadores tipo PEM, empleando la tecnología de intercambio protónico, para el funcionamiento de este electrolizador es necesario agua pura, lo que nos genera la producción de gases de alta pureza y bajos costos de purificación (Herraiz Cardona, 2012).

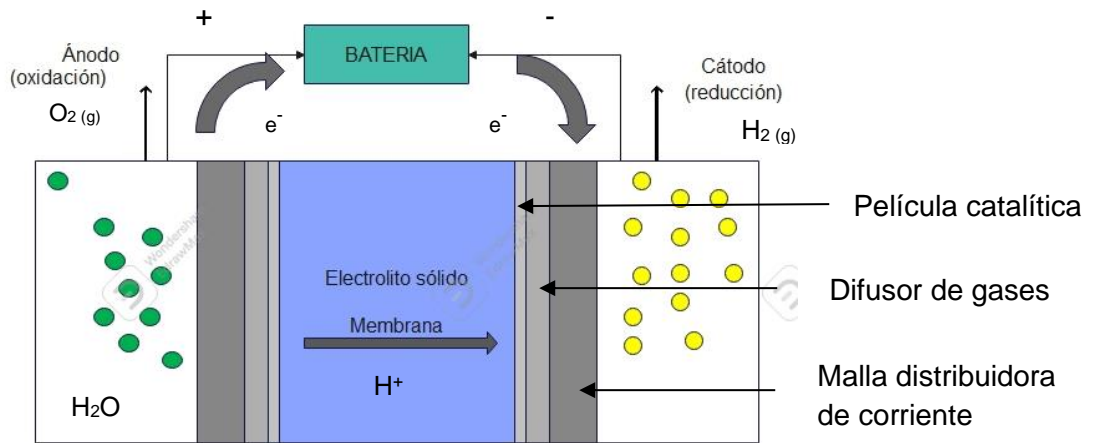
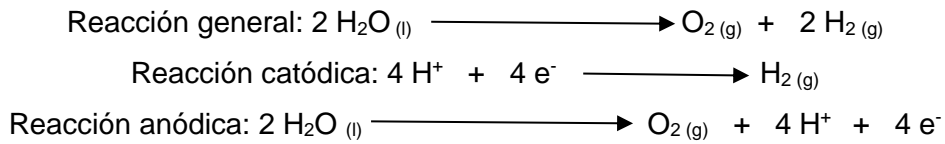


Figura 15. Modelo de un electrolizador de membrana de intercambio protónico tomada y reeditada de (Moreno Ruiz, 2009).



5.2.1.4 Electrolizadores de óxido sólido.

Los electrolizadores de óxido sólido se empezaron a desarrollar a principios de los años 70, operan a temperaturas muy altas, cercanas a los 1273.15 K, aprovechando al máximo el efecto de las altas temperaturas sobre las cinéticas y los parámetros termodinámicos de control de los procesos de electrólisis del agua (Figura 16), para generar hidrógeno a partir de vapor de agua, mediante la aplicación de calor para descomponer la molécula del agua en hidrogeno y oxígeno, con esta tecnología se pueden reducir los gastos en el consumo de energía eléctrica, además de contar con los beneficios de un electrolito sólido. Las celdas de óxido sólido trabajan a potenciales más bajos (entre 0.95 y 1.33 V) que los requeridos para los otros tipos de electrolizadores, en estos electrolizadores se usan electrolitos sólidos capaces de conducir iones, los cuales generan iones de oxígeno O₂, a una temperatura entre 1023.15-1273.15 K e iones hidrógeno H⁺, de 723.15-1023.15 K (Herraiz Cardona, 2012).

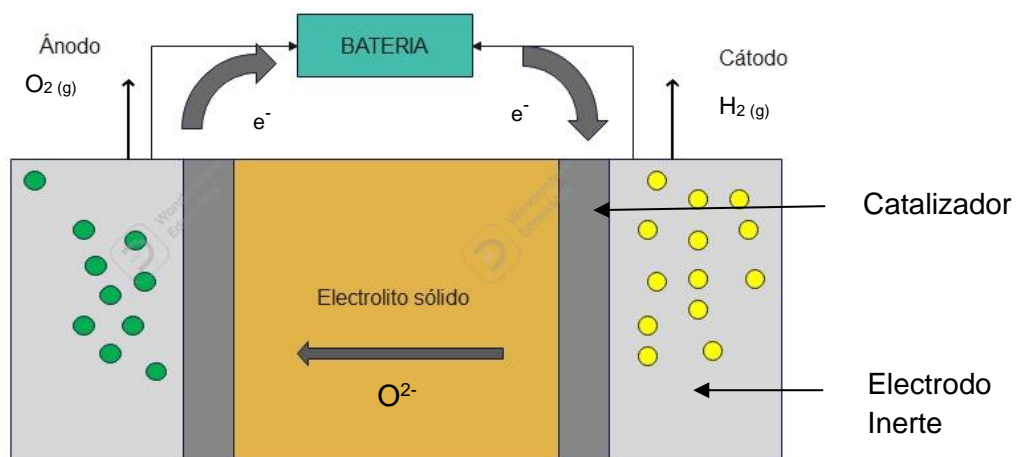
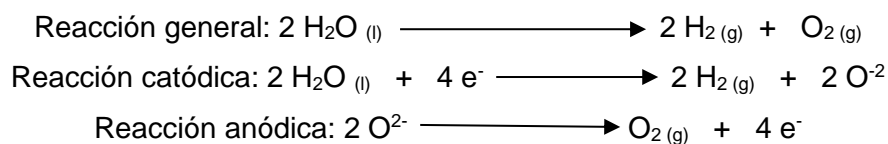


Figura 16. Modelo de un electrolizador de óxido sólido, tomada y modificada de (Moreno Ruiz, 2009).



5.2.1.5 Comparación de los diferentes electrolizadores.

La tabla 4 presenta un resumen de las características de los electrolizadores más importantes empleados en la actualidad, destacando las principales ventajas e inconvenientes del uso de cada una de las tecnologías (Herraiz Cardona, 2012).

Tabla 4. Comparación de las principales tecnologías de electrólisis de agua (Herraiz Cardona, 2012).

Electrolizador	Alcalino	Tipo PEM	Óxido sólido
Electrolito	NaOH o KOH	Polímero	Cerámica
Portador carga	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperatura	353.15 K	353.15 K	1273.15 K
Ventajas	<p>Tecnología madura.</p> <p>Gran durabilidad de los electrolizadores.</p> <p>Producción de H₂ a gran escala.</p>	<p>H₂ de mayor pureza</p> <p>Menores costos energéticos</p> <p>Puede trabajar a altas presiones.</p>	<p>Menor consumo de energía eléctrica.</p>
Desventajas	<p>Electrolito es una sustancia corrosiva.</p> <p>No puede trabajar a altas presiones.</p> <p>Alto costo de electrodos.</p> <p>Altos costos energéticos.</p>	<p>Electrolito más caro.</p> <p>Electrolito ácido, lo que encarece los materiales.</p> <p>Tecnología en vías de desarrollo, solo empleada a baja escala.</p>	<p>Fase inicial de desarrollo.</p> <p>Las altas temperaturas requieren materiales muy estables.</p>

5.2.2 Producción de oxígeno mediante un sistema criogénico (licuefacción).

En la actualidad el oxígeno se produce a escala industrial principalmente mediante destilación criogénica del aire. Éste es un proceso con un consumo energético muy alto de 12 a 13.3 kWh/kg de gas y sólo es económicamente viable a gran escala. La separación criogénica del aire se considera un método antiguo pero eficiente para la producción de oxígeno y nitrógeno puros en forma líquida y gaseosa en grandes volúmenes. La idea detrás de esta unidad de separación de aire son los diferentes puntos de ebullición de los gases presentes en el aire. Dentro de la unidad de separación criogénica del aire, la temperatura desciende lo que da como resultado la separación de nitrógeno y oxígeno en función de sus puntos de ebullición 77.36 K y 90.19 K respectivamente (Aljaghoub, 2023).

La industria de producción de gases industriales (oxígeno, nitrógeno, argón, etc.) a partir del aire es una actividad de enorme importancia económica. Las plantas criogénicas de separación del aire han servido bien a esta industria durante el siglo XX. Ahora sufren la competencia de otras tecnologías en determinados segmentos de mercado, pero también existen nuevas oportunidades para su desarrollo formando parte de ciertos complejos industriales (petroquímicas, centrales eléctricas IGCC, etc.). El aire es una mezcla de gases formada mayoritariamente por nitrógeno y oxígeno. También contiene pequeñas cantidades de argón y trazas de otros gases (CO₂, Ne, He) y una cantidad variable de vapor de agua. Aunque hoy en día se emplean distintas tecnologías para separar el aire en sus componentes las grandes plantas comerciales siguen utilizando el proceso tradicional de destilación criogénica (Clavería Vila, 2021).

Tanto el agua como el CO₂ se eliminan en una fase previa al proceso de separación de aire. El proceso más sencillo de esta tecnología es el de Linde con columna simple que fue utilizado por primera vez en 1902. Actualmente, las grandes compañías productoras (AIR LIQUIDE, AIR PRODUCTS, LINDE, PRAXAIR) emplean una gran variedad de procesos más complejos según sean los gases que se desean producir (O₂, N₂, Ar), el grado de pureza de estos (90 %, 99 %, 99.9 %, 99.99 %) y su fase (líquido, gas). La mayor parte de estos procesos utilizan la columna doble de Linde (Clavería Vila, 2021).

Las plantas de separación criogénica del aire constituyen un tipo especial de plantas químicas, basadas en procesos de licuefacción y destilación del aire. La destilación criogénica se utiliza principalmente para la obtención de nitrógeno, oxígeno y argón en cantidades elevadas (>100 ton/día), ya sea como producto líquido o gaseoso, o bien cuando se requiere una alta pureza de oxígeno (>95 %) o producir argón. Todos los procesos criogénicos están basados en la compresión del aire y su posterior enfriamiento a temperaturas muy bajas, para conseguir su

licuefacción parcial. Esto permite su destilación criogénica (basada en el fenómeno de que cada uno de los componentes puros del aire licúa a temperaturas diferentes) para separar los productos deseados en una columna de etapas múltiples. Puesto que la temperatura del proceso es muy baja es necesario que equipos como la columna de destilación, intercambiadores de calor y otros componentes estén aislados frente a transferencia de calor desde el medio ambiente (Clavería Vila, 2021).

La separación criogénica del aire es un proceso por el cual es posible obtener grandes cantidades de gases o líquidos de alta pureza. En la actualidad, la mayoría de nitrógeno y oxígeno se obtiene mediante la destilación criogénica del aire, donde además de estos dos productos, se puede separar también el argón presente en el aire. En este proceso, la columna de destilación empleada es un poco especial, ya que en realidad son dos columnas, una de alta presión y otra de baja presión, de 6.5 atm y 1.5 atm respectivamente, que funcionan una encima de la otra (Tudela Gallardo, 2019).

Esta tecnología se basa en el hecho de que los diferentes constituyentes del aire tienen diferentes puntos de ebullición, y manipulando el entorno en términos de presión y temperatura, es posible separar el aire en sus componentes (Boldrini, 2019).

Las empresas proveedoras de oxígeno medicinal, utilizan para su producción al sistema criogénico, que consiste en separar el oxígeno del nitrógeno y los otros gases que integran el aire, el cual es sometido a destilación logrando así la separación de sus componentes en virtud de sus diferentes puntos de ebullición. El oxígeno así obtenido tiene una concentración nominal de 99.5 % y está exento de contaminantes que puedan ser perjudiciales para la salud (Boldrini, 2019).

La producción de oxígeno medicinal por el sistema criogénico se desarrolla en las siguientes etapas (Figura 17):

- Filtración: Elimina impurezas del aire.
- Compresión: Reduce el volumen del aire hasta 6 veces la presión atmosférica.
- Enfriamiento: Deja el aire a temperatura ambiente.
- Purificación y secado: Remueve la humedad del aire y el dióxido de carbono.
- Refrigeración: Intercambia calor con gases fríos de la planta, aproximadamente a 268 K.
- Expansión y licuefacción: El aire se licua o condensa, queda líquido a 105 K.
- Destilación: Se hace en dos procesos:
 1. Se evapora y se condensa el nitrógeno, que se almacena en estado líquido en un tanque criogénico.

2. El condensado restante, enriquecido de oxígeno, es enviado a la parte superior de la columna de rectificación.

Este aire enriquecido se destila de nuevo, se extrae el nitrógeno restante y el argón, quedando oxígeno medicinal al 99.5 %. El nitrógeno sale en estado gaseoso y se expulsa a la atmósfera después de hacerlo pasar por el intercambiador de calor. El argón puede ser enviado a una columna de destilación y envasado para utilizarlo en la industria (Morrón Caballero, 2011).

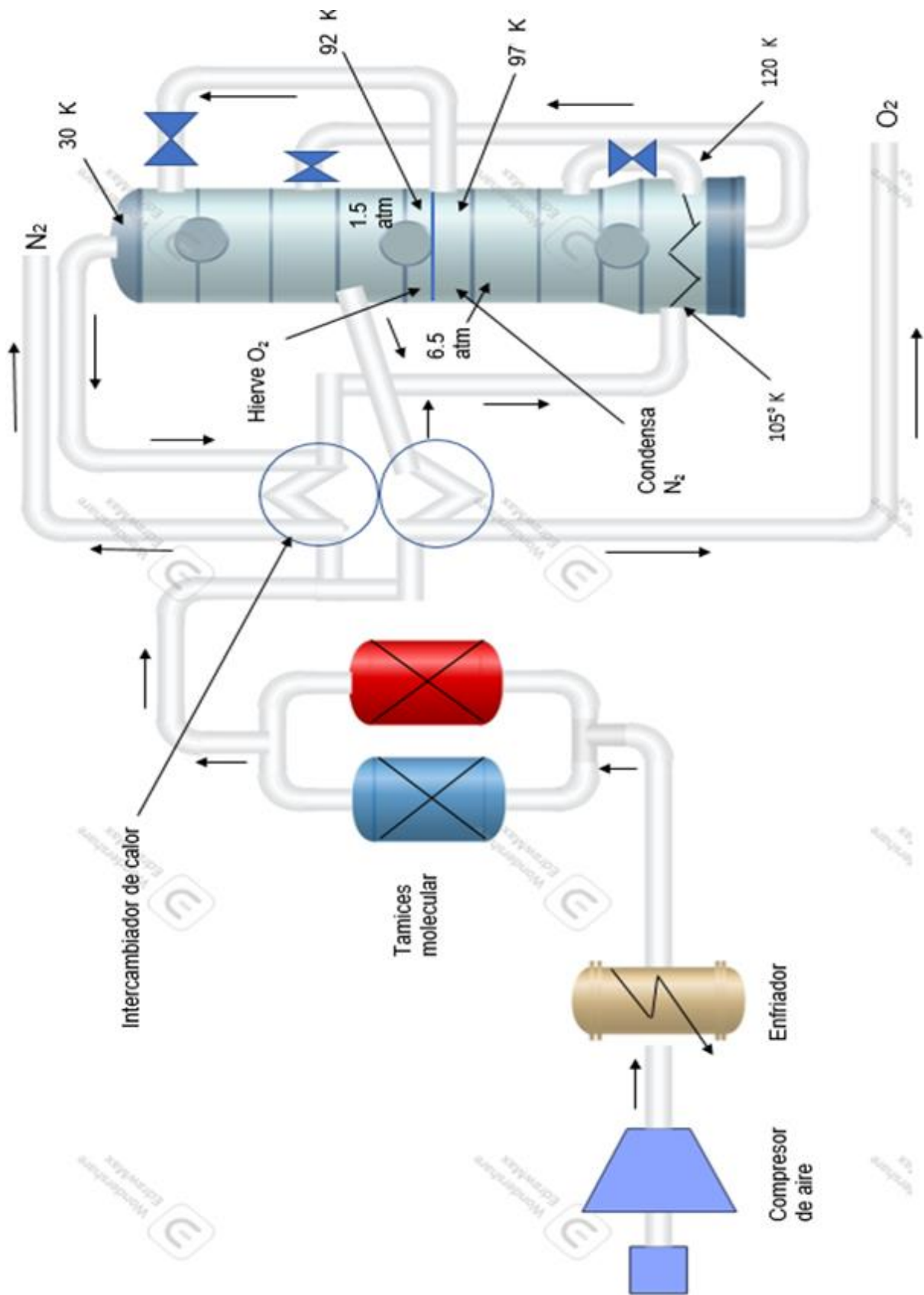


Figura 17. Esquema de producción de gases por un sistema criogénico, figura tomada y reeditada de (Tudela Gallardo, 2019).

La primera fase consiste en el acondicionamiento de la corriente de aire atmosférico, la cual se filtra y después comprime hasta seis veces la presión atmosférica y se enfría en un intercambiador de calor, bajando su temperatura hasta 268 K después el vapor de agua, dióxido de carbono, e hidrocarburos son separados del aire por medio del tamiz molecular (Tudela Gallardo, 2019).

La corriente es enfriada aún más cerca de su punto de condensación, aproximadamente 105 K, al circular a través de un serpentín que se encuentra en contacto con el líquido enriquecido en oxígeno (aproximadamente 40 % O₂) que se encuentra hirviendo en el fondo de la columna de alta presión, esta temperatura es necesaria en el siguiente paso del proceso que es la separación en la columna y la producción de gases en forma líquida (Tudela Gallardo, 2019).

Esta corriente, que contiene ahora una elevada fracción licuada, se introduce en la columna de alta presión como corriente de alimentación (parte inferior). El líquido enriquecido en oxígeno (40 % O₂) del fondo de la columna es laminado y alimentado a la columna de baja presión (parte superior). En esta columna es donde se produce la destilación, ya que de ella obtendremos un producto de cabeza con una composición de nitrógeno superior al 99.9 % y como producto de cola obtendremos una corriente de oxígeno con una composición aproximada del 95 % ya que contiene el argón que contenía el aire de entrada (Tudela Gallardo, 2019).

Para aumentar esta concentración se puede instalar una segunda columna, denominada columna de argón bruto, donde se podrán separar el argón y oxígeno. En el domo de esta columna se recogerá argón con una concentración entre el 95 % y el 98 % mientras que el producto de cola, es en su mayor parte oxígeno (Tudela Gallardo, 2019).

Cuando se requiere la producción de argón crudo, la columna de baja presión, es decir, la superior, se sangra en el plato en el que la concentración de argón es máxima, entre un 12% y un 16% y prácticamente no se encuentra nitrógeno (Cerrada Martínez, 2017).

Este vapor se alimenta en otra columna, que recibe el nombre de "columna argón bruto". El producto de fondo de esta columna, se realimentan a la columna de baja presión, puesto que es en su mayor parte oxígeno. Esta corriente de oxígeno recirculada formará parte del reflujó de la columna de baja presión. Por cabeza de la columna de argón bruto se recoge un argón con una concentración entre el 95% y 98% (Cerrada Martínez, 2017).

Los gases se separan del aire por medio de un proceso de destilación con el cual los gases son altamente condensados y vaporizados en las columnas hasta llegar a la concentración que se desee de cada gas. Este proceso se efectúa porque los gases tienen diferentes puntos de

ebullición: oxígeno, 90.15 K; argón 87.15 K; nitrógeno 77.36 K. Los gases son almacenados en forma líquida en tanques muy bien aislados. Se puede destacar que este método es el único económicamente viable para la obtención de argón puesto que este gas es tan solo el 1 % del aire y se obtiene como un subproducto en plantas de oxígeno de alta pureza (Boldrini, 2019).

Como ya se ha comentado, la destilación criogénica es el sistema más extendido en la actualidad para la producción de oxígeno y nitrógeno de alta pureza. Su principal inconveniente es que se trata de un sistema con un alto consumo energético, por lo que no resulta útil si tratamos con caudales pequeños o la demanda de producto es baja. No obstante, existen mejoras que permiten reducir los costos, como por ejemplo utilizar las corrientes de oxígeno y nitrógeno producidas para enfriar la corriente principal antes de su entrada a la columna (Tudela Gallardo, 2019).

5.2.3 Producción de oxígeno mediante un sistema PSA (Pressure Swing Adsorption).

Los adsorbentes por oscilación de presión (PSA) en comparación con los separadores criogénicos utilizan tanques de alta presión para la producción de oxígeno, este dispositivo toma aire atmosférico en el tanque altamente presurizado, para la separación de los gases presentes en la atmósfera, el tanque consta de zeolitas que crean dipolos en los que se aplica una presión sobre ellos, el dipolo creado por la zeolita seleccionada en el tanque da como resultado la recolección de nitrógeno gaseoso y la separación del oxígeno gaseoso. La depuración y enriquecimiento de oxígeno se realiza en otro tanque de presión mínima de 1.5 atm. La zeolita se satura después de cierto tiempo debido a la máxima adsorción del nitrógeno, para regenerar la zeolita la presión del tanque se reduce a la presión atmosférica, lo que permite que la zeolita vuelva a su polaridad original y que se libere el oxígeno (Morrón Caballero, 2011).

En la farmacopea americana (USP, por sus siglas en inglés), el oxígeno producido por licuefacción debe tener una pureza de 99 % y está exento de análisis de óxido de carbono y dióxido de carbono. En el caso del oxígeno producido por absorción, a diferencia del anterior, la USP exige una pureza de 93 % y un análisis de las impurezas, estableciendo límites tolerables para el organismo humano, determinando que no debe exceder de un máximo de 300 ppm de dióxido de carbono y de 10 ppm de óxido de carbono. La farmacopea europea define como oxígeno medicinal solo aquel que ha sido obtenido por proceso de licuefacción del aire, el que debe cumplir con un mínimo de pureza de 99.5 % pero también exige el cumplimiento del control de impurezas con los siguientes niveles de tolerancia; máximo de 300 ppm de dióxido de carbono y 5 ppm de óxido de carbono. A este control se suma el análisis de humedad que determina un máximo de 67 ppm (Morrón Caballero, 2011).

Esta mezcla se puede obtener típicamente en plantas de oxígeno con capacidades que varían desde la pequeña (pocos litros por minuto) a la gran escala (120 toneladas por día) y que operan con sistemas de tamices moleculares de tecnología adsorción con cambio de presión, (PSA por sus siglas en inglés). En ellos se somete el aire del medio ambiente a etapas de filtración y compresión antes de pasarlo a través de un lecho de zeolita, material que, dependiendo de la presión y temperatura, retiene más nitrógeno que oxígeno, resultando así un aire con mayor proporción de oxígeno. El oxígeno medicinal ha de almacenarse en cilindros de gas comprimido hechos de acero inoxidable o tanques de baja presión, que no deben haber sido tratados con ningún compuesto tóxico o irritante para el sistema respiratorio de los pacientes usuarios (Morrón Caballero, 2011).

Un sistema PSA de generación de oxígeno consiste en separar el oxígeno del nitrógeno que se encuentra en el aire comprimido, por medio de tamices moleculares, para ser almacenado y transportado por las redes existentes para ser suministrado a las diferentes áreas de consumo, bajo condiciones controladas de pureza y calidad (Morrón Caballero, 2011).

El método de producción mediante un sistema PSA consta de 5 etapas como se muestra en la Figura 18.

- Compresión de aire.
- Tratamiento del aire seco: secado y filtrado.
- Separación de oxígeno medicinal en las PSA.
- Análisis, registro, regulación, medición y control.
- Alimentación del oxígeno a la red de distribución.

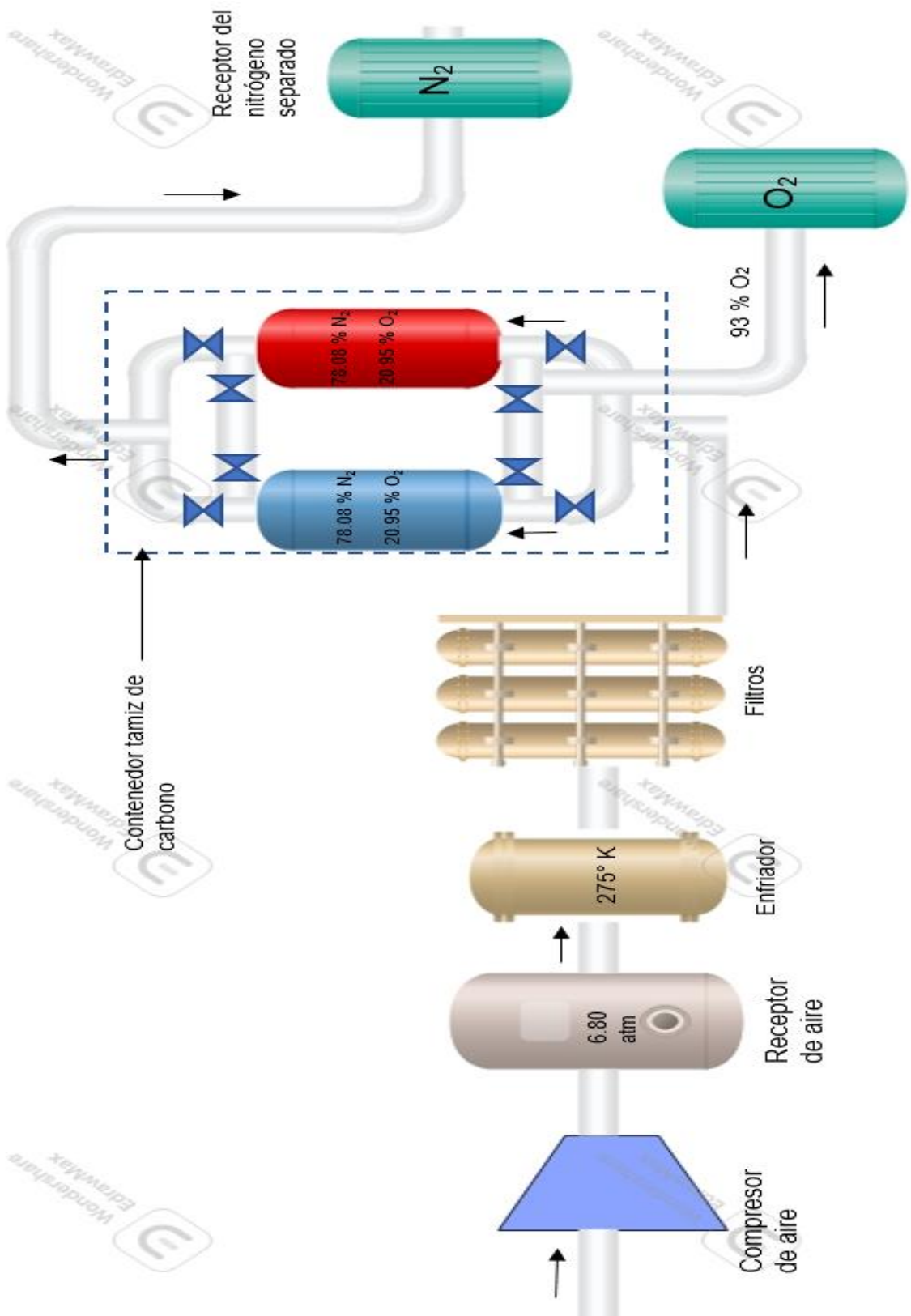


Figura 18. Esquema en bloque de un sistema de generación de oxígeno por PSA, figura tomada y modificada de Morrón Caballero (*Morrón Caballero, 2011*).

1. Compresión de aire:

Un compresor comprime el aire ambiental tomado de una altura de seis metros a nivel del piso, un filtro elimina las impurezas sólidas de la atmósfera, el aire atmosférico es comprimido entre 6.8 y 8.5 atm (Morrón Caballero, 2011).

2. Tratamiento del aire comprimido.

- Separación de fases en un recipiente (disminuye la velocidad del flujo del aire), con el fin de remover las fases líquidas, agua y aceite.
- Secador refrigerativo que separa la humedad del aire, enfría el aire comprimido a 275 K, permitiendo la condensación de la humedad y así se puede extraer del sistema en forma líquida.
- Filtración se efectúa con tres clases de filtros, uno coalescente de remoción de condensado y líquidos al 99.99 % un filtro ultrafino de aceite, que retiene partículas de aceite en un 99.999 % un filtro de carbón activo que retiene partículas volátiles y olores (Morrón Caballero, 2011)

3. Separación de oxígeno medicinal en las PSA:

La planta consta de dos PSA y en cada una entra el aire con su composición normal y es transportado en oxígeno de 93 % de concentración, el nitrógeno sobrante es expulsado a la atmósfera. Cada PSA tiene en la salida una válvula de tres vías que permite descargar a la atmósfera oxígeno de menos del 90 % y un analizador paramagnético que mide la concentración del oxígeno medicinal. Existe un tercer analizador a la salida de las dos PSA antes de entregar el oxígeno en la red. Las PSA utilizan zeolitas que constituyen un tamiz molecular, la adsorción es la retención por afinidad física (sin reacción química) en la superficie de un cuerpo, de las moléculas o iones de otro elemento. En el caso de este proceso las zeolitas absorben el nitrógeno (N_2) y otros gases del aire que son expulsados a la atmósfera (Morrón Caballero, 2011).

En la absorción no hay afinidad, la retención se genera por características estructurales del otro elemento. El tamiz molecular de la PSA absorbe selectivamente el nitrógeno y permite el paso del oxígeno, el cual, a su vez es almacenado en otro tanque. El primer lecho es entonces sometido a la desorción del nitrógeno por medio de la despresurización del recipiente. La concentración del oxígeno está en el rango de 90 % a 96 %. La generación de oxígeno medicinal exige un filtro esterilizante, con mantenimiento, el tamiz molecular tiene una vida indefinida (Morrón Caballero, 2011).

- Análisis, registro, regulación, medición y control:

En los procesos criogénicos en los cuales se empaqueta el gas en envases para su distribución, hay mayor riesgo de contaminación cruzada y confusión del producto que se reduce considerablemente en la técnica de producción *in situ* debido a que se desarrolla en un sistema cerrado y continuo hasta que llega al paciente. Por motivos de seguridad, explícitos en la Norma ISO 10083, se deben tener dos respaldos independientes: un tanque de reserva de oxígeno medicinal y un *manifold* que garantiza el suministro automático de oxígeno en caso de interrupción de la planta (Morrón Caballero, 2011).

El oxígeno medicinal se somete adicionalmente a dos filtraciones:

1. Un filtro coalescente fino de remoción de aceite y líquidos al 99.99 % que retiene partículas de aceite de 0.01 micras.
 2. Un filtro microbiológico esterilizante metálico que retiene microbios (Eliana Alfaro, 2013).
- Alimentación del oxígeno a la red de distribución.

El sistema PSA debe cumplir con las siguientes exigencias:

1. Válvula anti-retorno en la línea de suministro del concentrador de oxígeno.
2. El sistema concentrador de oxígeno tiene un sistema doble de regulación de presión, que provee una presión estable y nominal de 3.4 atm y con válvulas de alivio de presión, diseñadas para abrirse a 5.10 atm es decir el oxígeno debe entrar a la red de distribución con una presión de 3.4 atm y una concentración de oxígeno del 93 % (Eliana Alfaro, 2013).

Desde que se comercializaron por primera vez, los sistemas PSA han tenido un fuerte crecimiento a nivel de aplicación, ya que se trata de una tecnología menos costosa que los métodos tradicionales para la separación de los compuestos del aire, mucho más si se trata de volúmenes de aire a tratar relativamente pequeños. Los adsorbentes utilizados suelen ser tamices moleculares de carbón activado, que retienen el oxígeno y producen una corriente de nitrógeno de alta pureza, del 95 al 99.99 % en nitrógeno. No obstante, existen otra serie de adsorbentes más modernos, como las zeolitas, basados en polímeros inorgánicos y materiales más novedosos, que permiten mejorar los rendimientos. Las zeolitas son una parte crucial en la obtención de oxígeno, por lo cual se mencionará algunas de sus propiedades (Eliana Alfaro, 2013).

5.2.3.1 Origen de las zeolitas.

Las zeolitas fueron descritas por primera vez como una familia de minerales por el mineralogista sueco Axel Cronstedt en 1756, gracias al descubrimiento de la estilbita. Se definen como una clase de aluminosilicatos cristalinos basados en una estructura aniónica rígida, con canales y cavidades bien definidos y de tamaños cercanos a las dimensiones de muchas moléculas. Su nombre proviene de las palabras griegas “zeo”, hervir, y “lithos”, piedra. Esto se debe a que su descubridor observó que, al calentarlas con un soplete, las piedras burbujearan, por lo que las denominó “piedras que hierven”. En realidad, el fenómeno que observó Cronstedt fue la capacidad de las zeolitas para perder el agua contenida en su interior cuando se calientan (Eliana Alfaro, 2013).

La fórmula general de las zeolitas es $M_{x/n} [(AlO_2)_x(SiO_2)_y] mH_2O$, donde M es un catión metálico (catión de compensación de carga) que no forma parte de la estructura cristalina; x e y son el número de tetraedros de aluminio y silicio presentes en la estructura respectivamente y m el número de moléculas de agua de hidratación presente en la estructura cristalina. La estructura básica de las zeolitas consiste en tetraedros que contienen un átomo de silicio o de aluminio en su centro y comparten los vértices a través de átomos de oxígeno, de tal forma que cada oxígeno pertenece a dos tetraedros diferentes (Figura 19) (Eliana Alfaro, 2013).



Figura 19. Unidad mínima de construcción de las zeolitas editada y modificada de (Eliana Alfaro, 2013).

Estos tetraedros de aluminio o silicio se unen formando pequeñas agrupaciones con las que se pueden obtener la estructura de todas las zeolitas conocidas. El ordenamiento de estas estructuras determina la estructura microporosa de la zeolita, en la que el tamaño de poro es uniforme. Estas agrupaciones se unen formando estructuras más complejas que se encuentran presentes en la estructura de las zeolitas, pero que no necesariamente tienen que conformar toda la red cristalina.

Estas estructuras complejas permiten diferenciar las zeolitas y ordenarlas. Un ejemplo de estas estructuras es la unidad de sodalita, que es altamente estable y simétrica (Figura 20) (Eliana Alfaro, 2013).

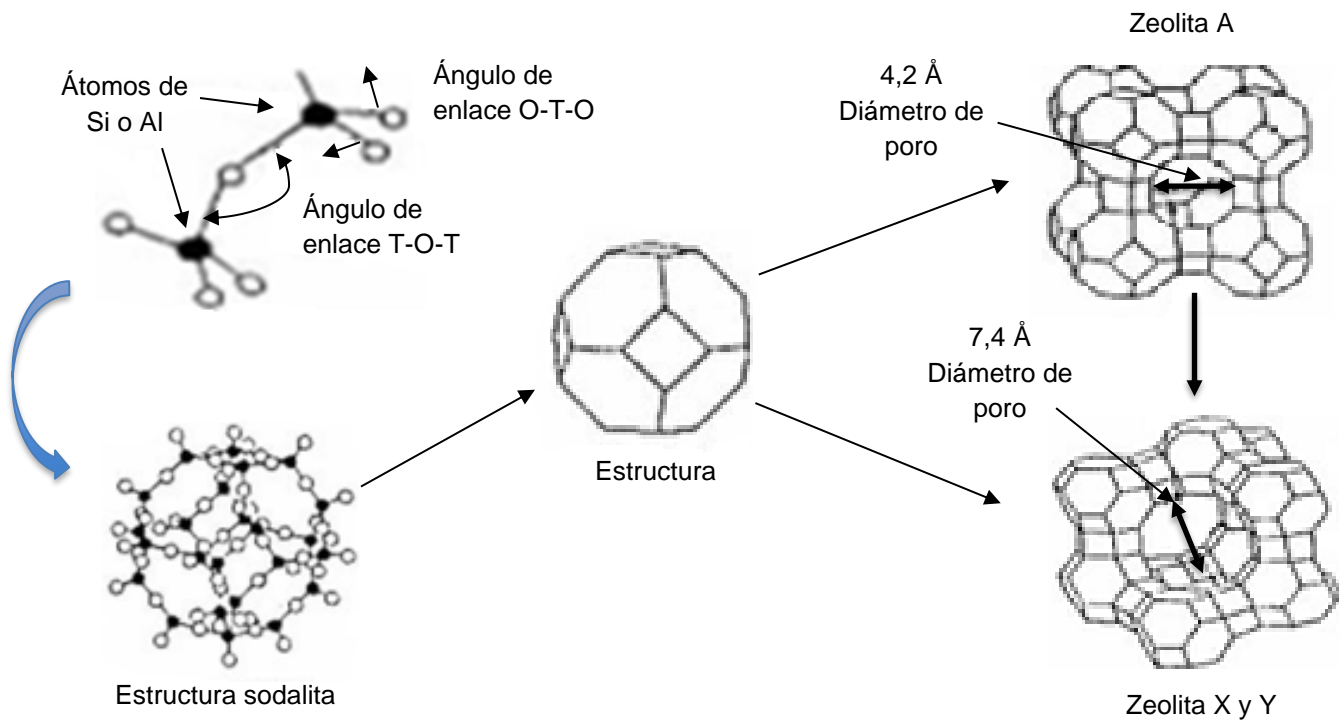


Figura 20. Estructura de la unidad de sodalita, tomada y reeditada de (Villavicencio, 2009).

Las zeolitas forman una familia de más de 80 especies minerales, que los mineralogistas conocen desde hace unos 200 años. Hacia 1920 ya se sabía que estos minerales poseen propiedades de absorción selectiva de sustancias, por lo que fueron llamados “tamices moleculares”, y al principio fueron utilizadas como agentes filtrantes. A fines de la década de 1940 ya existía una gran demanda comercial, pero la escasez de materias primas hizo que se iniciara el desarrollo de zeolitas sintéticas. Con el desarrollo de las zeolitas sintéticas, incluyendo la capacidad de dotarlas de cargas eléctricas, se posibilitó la fabricación de las plantas concentradoras PSA cuyo primer uso fue industrial. Hasta octubre de 2012 se han identificado 206 tipos de zeolitas según su estructura, de los cuales más de 40 se encuentran en la naturaleza, los restantes son sintéticos (hasta 1985 se habían sintetizado más de 600 zeolitas diferentes) (Tudela Gallardo, 2019).

Las zeolitas naturales son recursos geológicos relativamente abundantes en áreas volcánicas e intrusivas. Generalmente, el tamaño que pueden alcanzar los microporos o microcavernas de las zeolitas es de hasta 30 angstroms y sus canales varían entre 3 y 12 angstroms. Aunque las zeolitas se definen como una familia de minerales, la mayor parte de las zeolitas empleadas en los procesos industriales son de origen sintético. Obtener las zeolitas de forma sintética permite

controlar su composición y el tamaño de poro, además de tener un costo bastante bajo. El procedimiento más común para su síntesis es el método hidrotérmal. Es un método complejo basado en las velocidades de cristalización y en el que hay que controlar diversos factores para asegurarse de que la composición y la estructura final de la zeolita son las deseadas (Tudela Gallardo, 2019).

5.2.3.2 Principales usos de las zeolitas.

Las zeolitas pueden ser usadas con diferentes fines tales como:

- Filtrado de contaminantes de aire, vapores, olores, agentes agresivos aerosoles.
- Separación de oxígeno, argón o nitrógeno del aire.
- Filtrado de contaminantes en líquidos.
- Eliminación de trazas de agua en aire o líquidos.
- Separación de hidrocarburos en ambas fases.
- Mejoramiento en acción de detergentes y aditivos alimenticios.
- Catalizador en procesos químicos, en especial el del petróleo.
- Conversión de metanol en nafta (Eliana Alfaro, 2013).

5.2.3.3 Importancia de las zeolitas.

Las zeolitas, debido a sus poros altamente cristalinos, son consideradas como un importante tamiz molecular, pues sus cavidades son de dimensiones moleculares, de modo que, al pasar las aguas duras, las moléculas más grandes se quedan y las pequeñas siguen su curso, lo cual permite que salga un líquido más limpio, blando y cristalino. Paul Weisz descubrió en 1960 que algunos de estos tamices moleculares presentan selectividad de forma, por lo que son altamente específicos para algunas aplicaciones catalíticas (Eliana Alfaro, 2013).

5.2.3.4 Funcionamiento de la zeolita para concentrar el oxígeno en una planta PSA.

Un grano de zeolita tiene una configuración geométrica con numerosas cavidades, que en realidad son micro canales. Los procesos de ingeniería obtienen esos canales de diversas medidas, y el usado en plantas PSA es en general el de 4 Å, coincidente con la medida de las moléculas de oxígeno y nitrógeno que son 3.9 Å, 4.3 Å lo que permite que las moléculas de nitrógeno sean adsorbidas por la zeolita y las moléculas de oxígeno logren pasar por las cavidades (Tudela Gallardo, 2019).

5.2.4 Separación por membrana.

La tecnología de separación por membrana consiste en mover el aire a través de un filtro de membrana que permite que pasen los gases rápidos mientras permanecen los gases lentos, en este caso el oxígeno es el gas rápido y el nitrógeno y el argón son los gases lentos, se pueden lograr diferentes purezas variando el tiempo que el gas pasa en la filtración (Aljaghoub, 2023).

La separación de aire por membrana es una de las opciones más desarrolladas recientemente entre los métodos utilizados para separar gases, se trata de una tecnología que cuenta con más de 20 años de antigüedad y ha demostrado tener ventajas sobre otros métodos de separación tales como compacidad y poco peso, permite diseños modulares, es de bajo mantenimiento, bajo consumo de energía, bajo costo y amigable con el medio ambiente. Este método está basado en el principio de que diferentes gases tienen diferentes tasas de permeabilidad a través de una película de polímero (Tudela Gallardo, 2019).

En la Figura 21 se muestra un esquema básico del principio de la separación por membrana donde de una mezcla de gases de alimentación se logra retener un gas y permear otro a través de la membrana. También existe la posibilidad de utilizar una corriente de barrido proveniente de alguna realimentación de gas permeado. Las membranas presentan un método simple y menos costoso de producir oxígeno en comparación con otros procesos. El dilema asociado con la separación de membrana para la purificación de oxígeno es que las membranas requieren una gran cantidad de área superficial. Ciertas membranas cerámicas permiten la separación con un área más pequeña, pero requieren una alta corriente eléctrica. Esto presenta un problema de seguridad con la corriente y el calor que se produce. El equipo utilizado en la separación depende del tipo de membrana seleccionada. Por ejemplo, una membrana que separa utilizando un gradiente de presión como fuerza impulsora requiere un equipo que conste con un compresor y equipos que puedan soportar una presión sustancial (Boldrini, 2019).

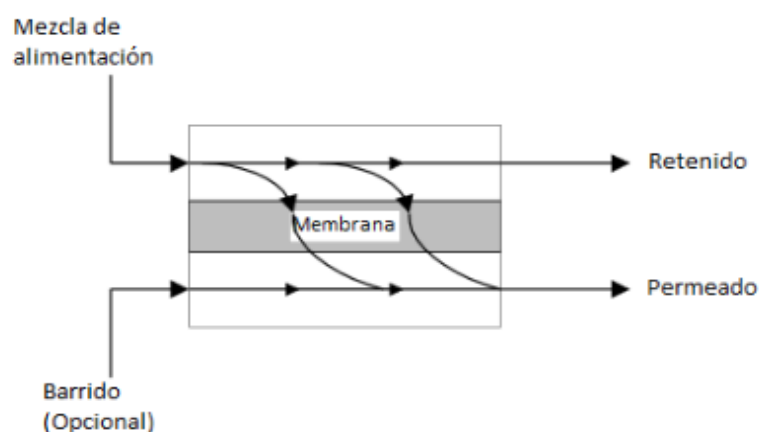


Figura 21. Separación por membrana (Boldrini, 2019).

En la Figura 22 se muestra el funcionamiento de la separación por membrana en un recipiente y la velocidad relativa de permeabilidad de los distintos gases de la mezcla de alimentación (Boldrini, 2019).

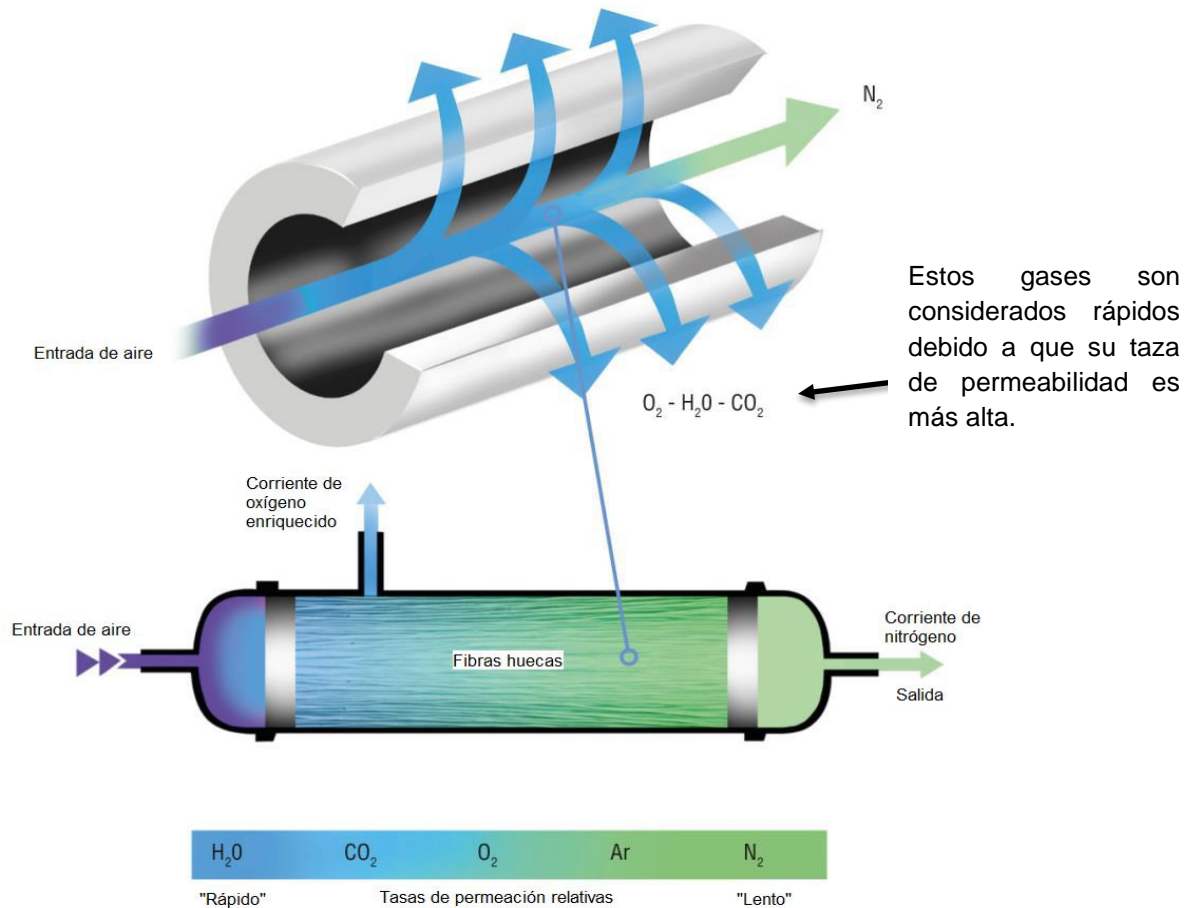


Figura 22. Funcionamiento en la separación de membrana (Boldrini, 2019).

5.2.4.1 Ventajas del sistema de producción por separación de membrana.

Las principales ventajas de los sistemas basados en membranas son la facilidad de operación, bajo costo y versatilidad, ya que se trata de unidades de tamaño compacto y peso reducido, lo que permite que se usen en prácticamente cualquier tipo de planta sin ocupar un gran espacio en la misma, además, son sistemas silenciosos y que permiten variar las condiciones del producto final, tales como pureza o caudal, de manera instantánea y no requiere de mantenimiento exhaustivo. Existe la posibilidad de aumentar la producción añadiendo más módulos de membranas, pero esto eleva los costos y hace que no resulte una opción rentable. La vida útil de las membranas se sitúa entre los 6 y los 8 años, pero se reduce a la mitad en el caso de su aplicación en procesos industriales. En definitiva, se trata de una tecnología que resulta mucho más útil en la obtención

de nitrógeno que en la de oxígeno, y aplicada a pequeñas producciones, más como un equipo complementario a otros procesos en los que se requiera nitrógeno que como un método de producción del oxígeno. Otros métodos basados en membranas, como puede ser la tecnología membrana de transporte de iones (ITM, por sus siglas en inglés) el principal problema es que son tecnologías que se encuentran todavía en desarrollo, por lo que no son una alternativa viable en este momento. Si hacemos una previsión de sus posibles puntos fuertes y débiles, la tecnología ITM permitiría obtener oxígeno prácticamente puro, aunque con caudales pequeños. Además, las condiciones del aire de entrada, temperatura entre 1073.15-1173.15 K y alta presión, suponen un costo energético elevado (Tudela Gallardo, 2019).

Las aplicaciones industriales de las membranas poliméricas como la tecnología para la separación de componentes de una mezcla han tenido un gran crecimiento desde que empezaran a ser viables comercialmente a finales del siglo XX. La separación por membranas es una tecnología ampliamente utilizada gracias a su facilidad de operación, su bajo costo y su tamaño compacto. Una de las principales aplicaciones de estas membranas se basa en la separación de gases, y más concretamente, en la producción de nitrógeno del aire, la recuperación de hidrógeno o el secado de aire para su utilización en otros procesos. En el proceso de producción de nitrógeno, el aire se comprime y filtra para eliminar impurezas, como vapor de agua o restos de aceite del propio compresor. Seguidamente se calienta el aire hasta la temperatura óptima de trabajo del polímero (entre 313.15 y 343.15 K) y se alimenta a los paquetes de membranas, formados por miles de fibras huecas dispuestas en una configuración tubo y carcasa dentro de los paquetes. El aire se introduce en estas fibras de manera axial, de tal forma que el oxígeno es permeado por la membrana, concentrando el nitrógeno en el interior de las fibras y recogiendo como producto. Este proceso físico es posible gracias a la diferencia de presión entre el aire presurizado de alimentación y el permeado de baja presión, que actúa como gradiente de presión permitiendo la permeabilidad a través de las membranas (Tudela Gallardo, 2019).

Los sistemas de membranas se suelen usar para la obtención de nitrógeno, ya que es el compuesto más abundante en el aire y supone la corriente de salida de las membranas de mayor volumen. La corriente de permeado, formado por oxígeno y argón en su mayoría, normalmente se desecha. No obstante, existen otros sistemas en desarrollo basados también en membranas que permiten obtener oxígeno con una pureza del 99 % y con costos inferiores a la destilación criogénica. Estos sistemas son denominados membrana de transporte de iones (requieren como alimentación una corriente de aire a alta presión y temperatura (1073.15-1173.15 K) como se muestra en la Figura 23. Este aire se hace pasar sobre una membrana cerámica hecha de metales agotados en oxígeno. La membrana acepta el oxígeno que es ionizado y difundido a través de la membrana debido a la diferencia de la presión parcial del oxígeno a lo largo de la membrana (Tudela Gallardo, 2019).

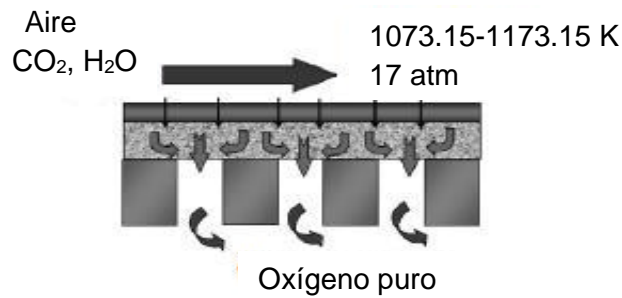


Figura 23. Sistema de membranas ITM (Tudela Gallardo, 2019).

5.2.4.2. Descripción del proceso de separación de oxígeno con el uso de unidades de membranas.

El sistema de separación de gases por membrana consta de diversas unidades de membrana en serie (Figura 24), antes de la primera unidad de membrana se encuentra un compresor, la primera unidad de membrana es un prefiltro para eliminar el polvo y las partículas de suciedad que normalmente se encuentran en el aire, esta unidad no tiene función de separación de gases (Adhikari, 2021).

La primera unidad de membrana de separación de gases sigue después del prefiltro y se instala una bomba de vacío en el lado del permeado de la membrana de separación de gases para mejorar el transporte de masa. Esta es una técnica comúnmente empleada en la práctica y en TEAS para sistemas de separación de gases (Adhikari, 2021).

El tamaño de la bomba para el prefiltro de la primera unidad de separación de gases y la unidad de vacío dependen de la cantidad de gas de alimentación que se necesita procesar y de la selectividad del gas y la permeabilidad de la membrana. Los módulos de membrana que siguen al primer módulo son opcionales según el diseño de proceso preferido. Tanto el compresor como las bombas de vacío para cada unidad de membrana también son opcionales después de la primera unidad de membrana. Un segundo módulo de separación de gases sigue a la primera unidad secuencialmente donde el permeado del primero se convierte en la alimentación del segundo, en el modelo también se considera una tercera unidad y se opera de manera similar (Adhikari, 2021).

El tamaño de las bombas y de la unidad de membrana depende del volumen de gas, la presión que deben de generar las bombas, el vacío que se elija para mejorar la fuerza impulsora transmembrana y las propiedades de separación de las membranas, las siguientes son del mismo tipo de módulo que la primera, aunque no es necesario que lo sean. En última instancia, el sistema crea un producto de gas con una cierta pureza y el costo total se puede calcular por kg (Adhikari, 2021).

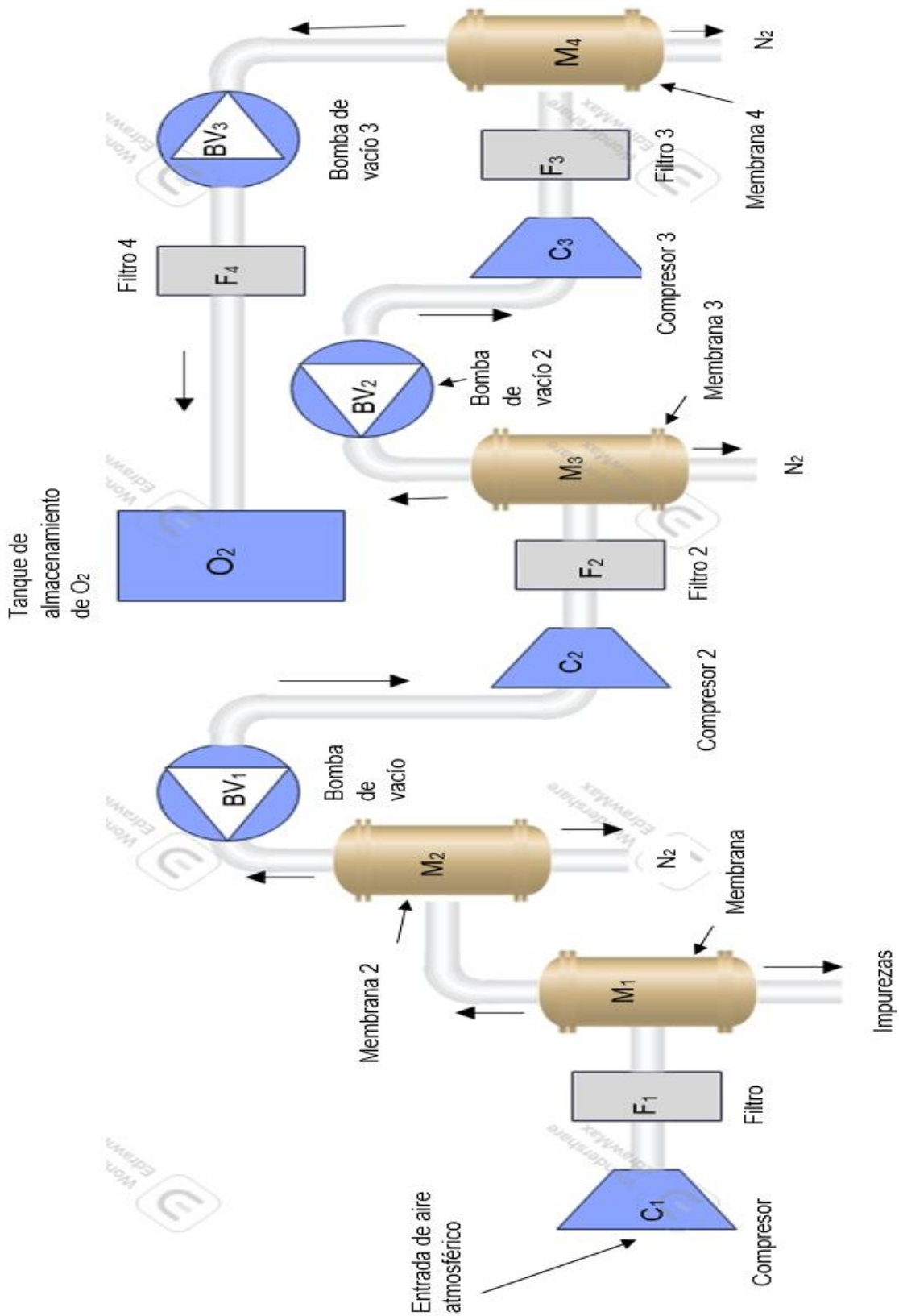


Figura 24. Esquema del proceso de separación de oxígeno por cuatro unidades de membrana en serie, tomada y reeditada de (Adhikari, 2021).

5.2.4.3 Sistemas de membrana de una etapa.

Un sistema de membrana de una sola etapa consta de un prefiltro y una unidad de membrana selectiva en serie, en la cual varían dos parámetros.

- La permeabilidad de la membrana donde la selectividad se mantiene constante.
- La selectividad de la membrana donde la permeabilidad se mantiene constante.

El sistema se puede diseñar con una bomba que entrega presión a 1.7 atm, el sistema de vacío está conectado al lado del permeado del módulo que puede aplicar el vacío a 0.2 atm (Adhikari, 2021)

5.2.4.6 Membranas utilizadas en la separación del oxígeno.

Las membranas cerámicas de conducción mixta iónica-electrónica, o MIEC (mixed ionic-electronic conducting) son unos materiales desarrollados en la década de 1970 para la separación del oxígeno del aire a elevada temperatura. En el futuro, estas membranas podrían aplicarse en sistemas pequeños para la producción de oxígeno puro. La razón por la que estos materiales son capaces de separar el oxígeno se debe a la existencia de una elevada concentración de huecos de oxígeno en la matriz de óxidos metálicos que conforman el material cerámico. A altas temperaturas, los aniones de oxígeno adquieren movilidad, con lo que una elevada difusión de oxígeno tiene lugar debido a los saltos de aniones de oxígeno hacia las vacantes cercanas. También se da el caso que la estructura cristalina contiene suficiente espacio interno para permitir a los aniones ocupar espacios intersticiales, lo que contribuye aún más a la conductividad iónica del material. Existen dos tipos de membranas densas cerámicas, las membranas puramente conductoras de oxígeno (electrolitos de óxido sólido) y las de conducción mixta iónica-electrónica, (MIEC por sus siglas en inglés). Para que se dé lugar la permeación de oxígeno a través de la membrana es necesaria una fuerza impulsora, ésta puede ser un gradiente de potencial eléctrico o uno de potencial químico (García Fayos, 2012).

Dentro de las membranas de separación para la obtención de oxígeno se pueden distinguir dos tipos de membranas, las membranas poliméricas semipermeables de difusión y las membranas de transporte iónico-electrónico de tipo MIEC (Cuenca Alcocel, 2019).

5.2.4.6.1 Membranas poliméricas de difusión.

Las membranas poliméricas de difusión para la separación de oxígeno están hechas de materiales poliméricos con diferentes proporciones de difusión del oxígeno y el nitrógeno. En este tipo de membranas, el flujo de oxígeno obtenido está determinado por la superficie expuesta y es una función de la diferencia de presiones entre los flujos a ambos lados de la membrana. En estos sistemas, el oxígeno, debido al menor tamaño de sus moléculas frente al tamaño de las moléculas de nitrógeno, difunde más fácilmente a través de los poros de la membrana. La existencia de otros gases en el aire cuyas moléculas son más pequeñas que las del oxígeno y el inevitable paso de una fracción de nitrógeno relativamente importante, suponen que el flujo resultante al otro lado de la membrana tenga una proporción de oxígeno de entorno del 25-50 %, siendo el resto principalmente nitrógeno (Cuenca Alcocel, 2019).

Este hecho hace que este tipo de membranas no sean muy eficientes en la reducción de la emisión de NOx. Las mayores ventajas de estas membranas son su simplicidad y su capacidad para operar en condiciones térmicas similares a las ambientales, siendo únicamente necesario incrementar la presión del flujo de aire para forzar la difusión a través de las membranas (Cuenca Alcocel, 2019).

La Figura 25 muestra un esquema típico de un sistema de obtención de oxígeno basado en membranas poliméricas de difusión. Como se puede observar, el aire inicialmente filtrado es comprimido por un compresor centrífugo y tras un segundo proceso de filtrado, entra en las membranas poliméricas. Estas se disponen en módulos tubulares cilíndricos para incrementar el área expuesta minimizando el volumen del sistema. Tras atravesar los módulos de membranas, el aire que no ha podido difundir a la otra parte de las membranas, principalmente nitrógeno, es desechado. El flujo rico en oxígeno resultante es bombeado por un segundo compresor centrífugo para mantener de esta forma un gradiente de presiones elevado a ambos lados de la membrana, que favorece la difusión del oxígeno (Cuenca Alcocel, 2019).

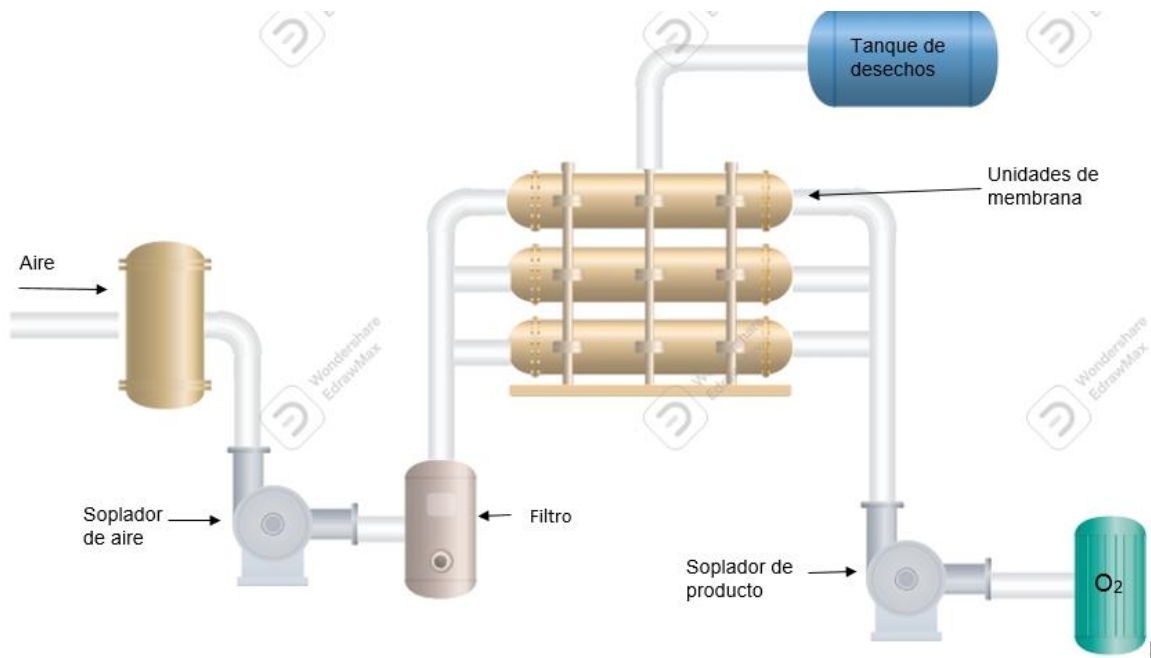


Figura 25. Esquema de un sistema de obtención de oxígeno basado en membranas poliméricas de difusión (Cuenca Alcofel, 2019).

Esta tecnología se puede ajustar hasta aplicaciones con un requisito máximo de 20 toneladas de oxígeno por día y su rápido tiempo de arranque la hace atractiva en aplicaciones de funcionamiento discontinuo. Sin embargo, como se ha remarcado anteriormente la elevada fracción de nitrógeno en el flujo resultante limita su utilización en aplicaciones de oxicomustión (Cuenca Alcofel, 2019).

5.2.4.6.2 Membranas de transporte iónico-electrónico de tipo MIEC.

Las membranas de transporte iónico-electrónico de tipo MIEC están formadas por óxidos inorgánicos cerámicos y son capaces de generar un flujo rico en oxígeno gracias al paso de los iones de oxígeno a través de su estructura cristalina (Cuenca Alcofel, 2019).

Este proceso de conducción mixta iónica-electrónica en óxidos inorgánicos cerámicos, fue inicialmente descrito por Takehiko Takahashi en 1976, en sus estudios sobre los óxidos cerámicos de Bi_2O_3BaO . Pronto se pudo ver el potencial de dicho fenómeno en la conducción de iones de oxígeno en membranas, siendo los primeros trabajos referentes a ello los realizados por Cales y Baumard en 1982, sin embargo, no fue hasta 1985 cuando Yasutake Teraoka consiguió un flujo estable de oxígeno a través de una membrana de perovskita. Desde entonces, las membranas de conducción mixta iónica-electrónica, han tenido un amplio desarrollo, sobre todo en los últimos años, como mecanismo para conseguir un flujo rico en oxígeno, para posteriormente ser

aprovechado en la generación de energía limpia a través de oxidación o también en la síntesis de combustibles (Cuenca Alcocel, 2019).

En estas membranas, a temperaturas elevadas y bajo una significativa diferencia de presiones parciales de oxígeno a ambos lados de la membrana, el oxígeno fluye en forma de iones desde el lado de alta presión parcial al de baja presión parcial, consiguiendo como resultado un flujo rico en oxígeno al otro lado de la membrana, con concentraciones que pueden llegar hasta el 50 % (Cuenca Alcocel, 2019).

La principal ventaja de este tipo de membranas frente a las membranas de difusión es que, a diferencia de estas últimas, presentan una selectividad del 100 % al paso del oxígeno, permitiendo en consecuencia conseguir un flujo rico en oxígeno sin trazas de argón u otras moléculas más ligeras, pero lo que es más importante, sin contenido en nitrógeno, y por lo tanto ideal para conseguir un proceso de oxidación sin emisión de NOx (Cuenca Alcocel, 2019).

Adicionalmente las membranas de transporte iónico-electrónico, requieren de un menor salto de presiones a ambos lados de la membrana, de tan solo 1 bar como mínimo, lo cual supone unos menores esfuerzos estructurales en ella, permitiendo membranas de menor espesor. Esto resulta además en una mayor eficiencia en peso y área frente a las membranas poliméricas, para conseguir el mismo caudal de oxígeno, las membranas MIEC presentan un menor peso y área. Por estos motivos las membranas de tipo MIEC están siendo objeto de un amplio desarrollo y estudio en los últimos años, como una tecnología capaz de generar una fuente estable de un gas con alta concentración de oxígeno para la realización de la oxidación (Cuenca Alcocel, 2019).

Cabe destacar que, dentro de las membranas de separación basadas en el transporte de iones de oxígeno, existen a su vez dos tipos principales, las membranas de conducción iónica pura y las membranas de conducción mixta iónica electrónica (MIEC). En las membranas de conducción iónica pura, los iones de oxígeno son transportados por el material de la membrana mientras que los electrones son transportados por un sistema externo, normalmente un electrodo (Cuenca Alcocel, 2019).

Por otro lado, en las membranas de conducción mixta iónica-electrónica, el material de la membrana transporta tanto los iones de oxígeno como los electrones. Pudiendo distinguirse además entre membranas MIEC mono-fase, en las cuales un único material es capaz de transportar tanto los iones de oxígeno como los electrones, y las membranas MIEC doble-fase en las cuales un material transporta los iones de oxígeno y el otro los electrones, tal y como se puede apreciar en la Figura 26 (Cuenca Alcocel, 2019).

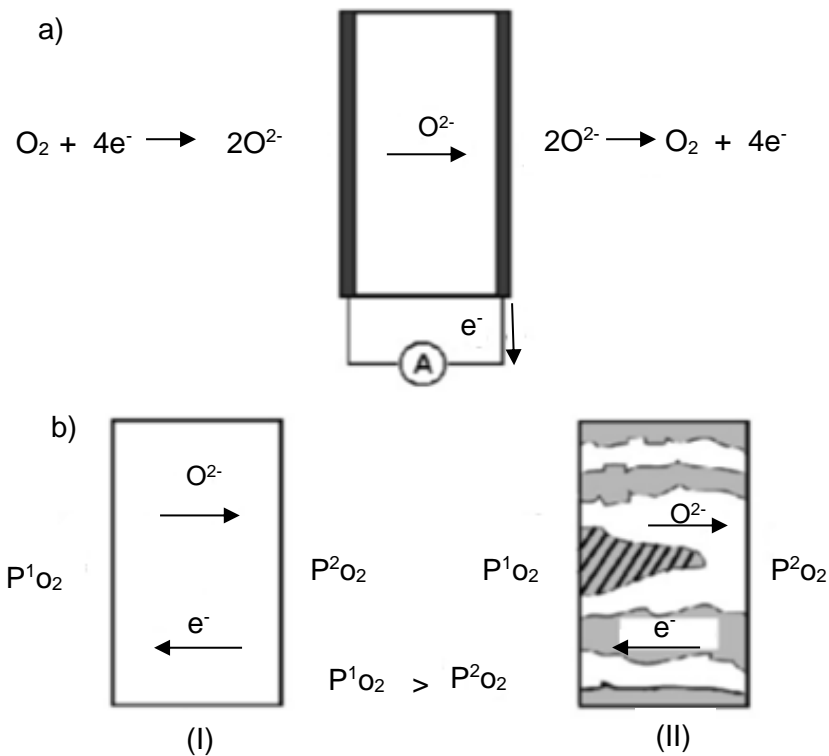


Figura 26. Tipos de membranas basadas en el transporte de iones de oxígeno. (a). Membranas de conducción iónica pura. (b) Membranas de conducción mixta iónica-electrónica, mono-fase (I) y doble-fase (II) (Cuenca Alcocel, 2019).

5.2.5 Concentradores de oxígeno.

Los concentradores de oxígeno proporcionan una fuente de aire enriquecida de oxígeno (a veces son denominados generadores de oxígeno), son dispositivos que extraen el aire de la habitación a través de una serie de filtros que eliminan el polvo, las bacterias y otras partículas (Hardavella, 2019).

En el primer paso es cuando el concentrador introduce aire en uno de los dos cilindros que contienen un tamiz molecular o membranas semipermeables, donde se adsorbe el nitrógeno dejando el oxígeno concentrado (90 % o más) y un pequeño porcentaje de otros gases que se encuentran en el aire, al mismo tiempo, en el otro cilindro el nitrógeno se desorbe y se extrae a la atmósfera (Hardavella, 2019).

En el segundo paso, la función de los cilindros se invierte en un ciclo cronometrado, proporcionando un flujo continuo de oxígeno típico puede generar flujos de oxígeno de 0.5 – 5 L/min, (concentradores de oxígeno de bajo flujo), mientras que algunos modelos pueden generar hasta 10 L/min (concentradores de alto flujo) (Hardavella, 2019).

5.2.5.1 Tipos de concentradores de oxígeno.

Hay dos tipos de concentradores de oxígeno; estacionarios y portátiles. Los concentradores estacionarios (domésticos), proporcionan un suministro de oxígeno ininterrumpido con un flujo que oscila entre 0.5 y 10-15 L/min. Tienen un peso medio de unos 10 kg, tienen varias manijas ergonómicas incorporadas para ofrecer opciones para levantar o hacer rodar el dispositivo. Actualmente los nuevos concentradores en miniatura han ingresado recientemente al mercado, lo que hace que los concentradores estacionarios sean más móviles y tengan algunas ventajas y desventajas que se encuentran en la tabla 6 (Hardavella, 2019).

El concentrador debe de conectarse al suministro eléctrico principal ya que usa 300 W o más por hora un consumo estimado al de cuatro bombillas, algunas veces proporciona un cilindro de gas comprimido de respaldo, para usar en caso de alguna falla eléctrica (Hardavella, 2019).

Una opción novedosa es un concentrador doméstico super pequeño, que puede pesar aproximadamente 4.5 kg, estas unidades funcionan tanto con corriente alterna, como con corriente continua y son móviles (Hardavella, 2019).

Los concentradores de oxígeno portátiles son la última tecnología para los estudios de LTOT (terapia de oxígeno a largo plazo por sus siglas en ingles), que desean una solución de oxígeno pequeña, liviana y portátil en una unidad compacta y móvil. Los concentradores portátiles varían en peso, tamaño, configuraciones de flujo de oxígeno, rango en L/min y duración de batería, así como en algunas otras especificaciones (Hardavella, 2019).

Las principales diferencias entre los concentradores estacionarios y portátiles se pueden resumir en cuatro:

- Producción de oxígeno.
- Tamaño y peso.
- Opciones de energía.
- Precio.

Los concentradores de oxígeno estacionarios tienen una mayor producción de oxígeno y menores costos, los concentradores de oxígeno portátiles ofrecen un menor tamaño y peso, así como una mayor flexibilidad con las fuentes de energía. La mayoría de los concentradores de oxígeno portátiles usan baterías de iones litio, que se degradan con el tiempo. La mayoría de estas se pueden recargar aproximadamente 300 veces sin sufrir degradación significativa (Hardavella, 2019).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los concentradores de oxígeno (Hardavella, 2019).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Los concentradores de oxígeno no necesitan recargarse.</p> <p>Funcionan con energía eléctrica, por lo tanto, suministran una cantidad ilimitada de oxígeno.</p> <p>Los concentradores portátiles se pueden usar en modo “sobre la marcha” con un paquete de baterías, lo que da como resultado hasta 12 h de uso continuo para algunos modelos.</p> <p>Desde una perspectiva a largo plazo, los concentradores son más rentables que los cilindros de gas comprimido y se sabe que duran hasta 1500 h de uso continuo.</p>	<p>Necesita energía eléctrica para funcionar.</p> <p>Es necesario prepararse para para cortes de energía no programados instalando un generador de energía de respaldo en el hogar.</p> <p>Los pacientes que usan concentradores de oxígeno estacionarios deben considerar cambiar los filtros semanalmente, el mantenimiento regular y periodo de calentamiento de la máquina, así como el ruido y la vibración de los modelos más antiguos del dispositivo.</p>

5.2.5.3 Funcionamiento de los concentradores de oxígeno.

Un concentrador de oxígeno es un dispositivo médico autónomo, alimentado por electricidad, que está diseñado para concentrar el oxígeno a partir de aire del ambiente, valiéndose del proceso denominado adsorción por presión oscilante, este aparato produce oxígeno concentrado de hasta un 95.5 % de pureza (Organización mundial de la Salud, 2016).

El aire atmosférico se hace pasar por un filtro de partículas gruesas de entrada antes de enviarlo al compresor. El aire a presión atraviesa un intercambiador térmico para reducir la temperatura antes de pasar por los tamices moleculares, que contienen zeolita, un mineral que a presiones elevadas adsorbe el gas nitrógeno (N₂) de manera preferencial, cuando cada tamiz se despresuriza, se libera el N₂ gaseoso. Se abren entonces unas válvulas para que el oxígeno concentrado se acumule en un depósito, desde el cual se puede usar un flujómetro para la liberación dosificada y continua de oxígeno al paciente con un gasto tasa de flujo especificada. En la Figura 27 se presenta el diagrama de un concentrador de oxígeno típico (Organización mundial de la Salud, 2016).

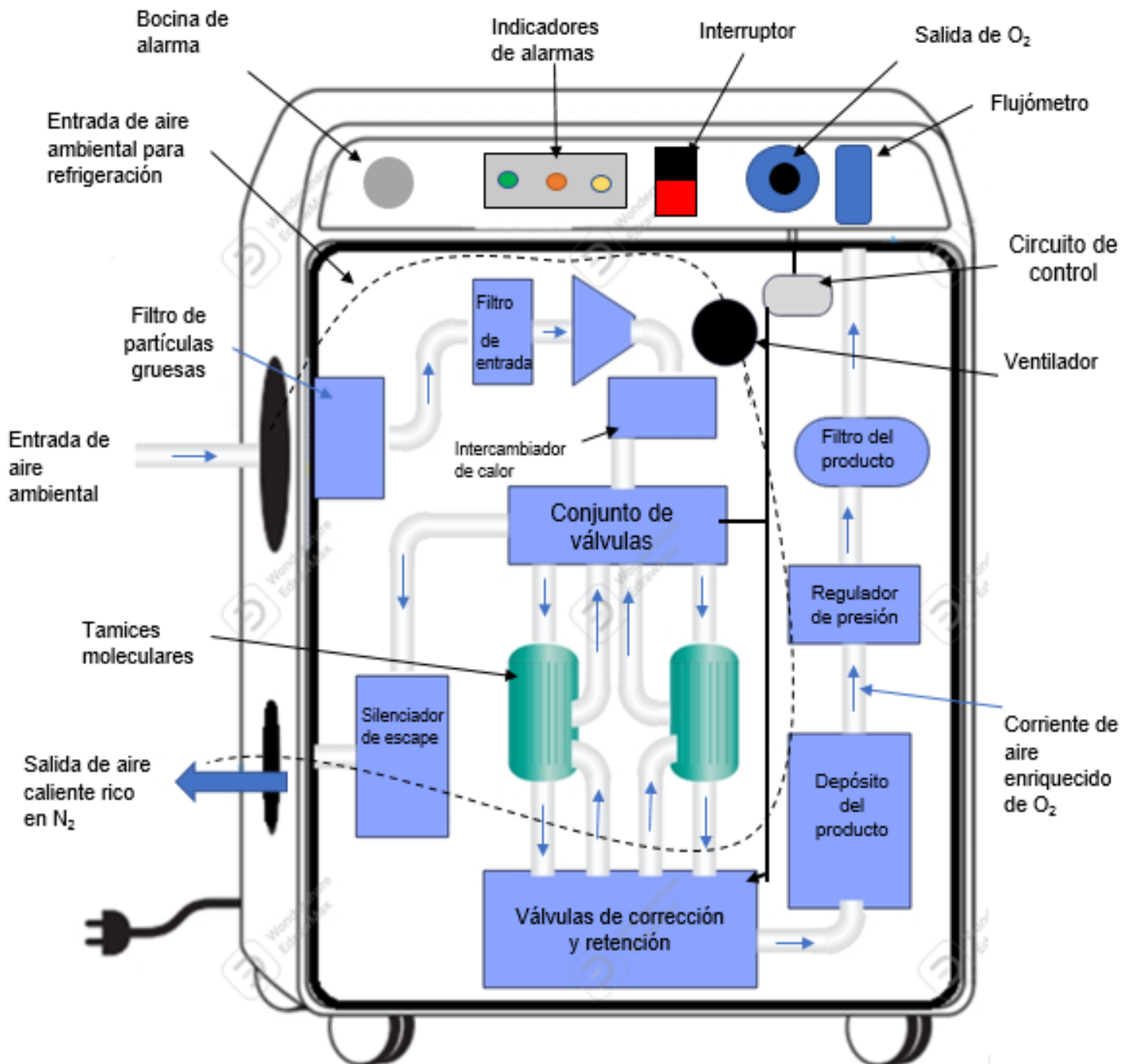


Figura 27. Esquema del funcionamiento de un concentrador de oxígeno, tomada y reeditada de (Organización mundial de la Salud, 2016).

6. APLICACIONES DEL OXÍGENO

El oxígeno no solo se emplea en procesos biológicos como la respiración celular o fines médicos como oxígeno suplementario, sino que es un elemento muy importante también en procesos industriales, una de sus principales aplicaciones es la industria siderúrgica (Gutiérrez Ríos, 1978).

El oxígeno se utiliza en una variedad de aplicaciones: farmacéuticas, médicas, acuicultura, gas de alimentación para generadores de ozono, soplado de vidrio, lixiviación, reducción de NOx para quemadores de combustible, lixiviación y soldadura de oxígeno (Omega Air, 2021).

6.1 Oxígeno industrial.

El oxígeno industrial se utiliza en la industria siderúrgica, entre el 65 % y el 85 % del oxígeno industrial producido en todo el mundo se emplea en la producción de acero, también se emplea para acelerar el proceso y para retirar el carbono del acero final, que suele contener en torno al 2 % de carbono. También se utiliza para limpiar impurezas de las planchas de acero y para cortar y soldar estas planchas, como por ejemplo en los sopletes de acetileno, capaces de cortar metal con suma rapidez. Otro de los grandes usos del oxígeno radica en la industria química, se emplea por ejemplo para fabricar óxido de acetileno, material básico para la fabricación de materiales plásticos y textiles, el cual es muy tóxico ya que se considera carcinógeno. Además, en función de la proporción, temperatura y los catalizadores empleados, se forman distintos compuestos cuando el oxígeno reacciona con algunos combustibles como carbón o gas natural. Controlando las condiciones mencionadas, se puede obtener una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono que se emplea en la producción de gasolina sintética, metanol o amoníaco (Gutiérrez Ríos, 1978).

Es un gas comburente por su propiedad de ser una gran oxidante, por lo que, se debe extremar precauciones ante posibles fugas y se debe usar equipo de protección adecuado para prevenir incidentes al controlarlas. Una buena práctica consiste en evitar la cercanía de todo tipo de material inflamable, fuentes de ignición y luz solar directa. Asimismo, los cilindros deben estar asegurados apropiadamente para evitar que sean derribados, y la válvula reguladora de presión esté protegida de impactos. El oxígeno industrial tiene, en principio, los mismos componentes que el oxígeno medicinal, dado que en la manufactura de ambos se procesa la misma materia prima, aire (UTEC, 2021).

El oxígeno industrial se suele producir mediante plantas de oxígeno que operan unidades de separación de aire, air separation units (ASU por sus siglas en inglés) mediante destilación a muy bajas temperaturas. El aire se somete a etapas de remoción de impurezas, compresión, expansión

y enfriamiento a fin de alcanzar temperaturas lo suficientemente bajas como para que el nitrógeno (punto ebullición: 77.36 K) pueda separarse como vapor y el oxígeno (punto ebullición: 90.19 K) como líquido en una columna de destilación criogénica. El nitrógeno es típicamente purgado, mientras que el oxígeno líquido producido se almacena y se gasifica nuevamente, según sea necesario (UTECH, 2021).

6.1.1 Oxígeno industrial en la producción de ozono para tratamiento de aguas (90 % a 95 % de pureza).

El oxígeno industrial se usa en la producción de ozono (Figura 28). El ozono es muy útil en una variedad de situaciones cotidianas, desde eliminar olores hasta proporcionar agua potable limpia y de calidad. El agua limpia y pura es una necesidad humana fundamental. Ya sea para cocinar o para la higiene, cada persona necesita agua de calidad. El agua limpia es cada vez más difícil de obtener a medida que nuestro consumo mundial de agua continúa aumentando. Al inyectar oxígeno en su sistema de agua, puede aumentar la eficiencia en la eliminación de contaminantes e impurezas de su suministro de agua (Omega Air, 2021).

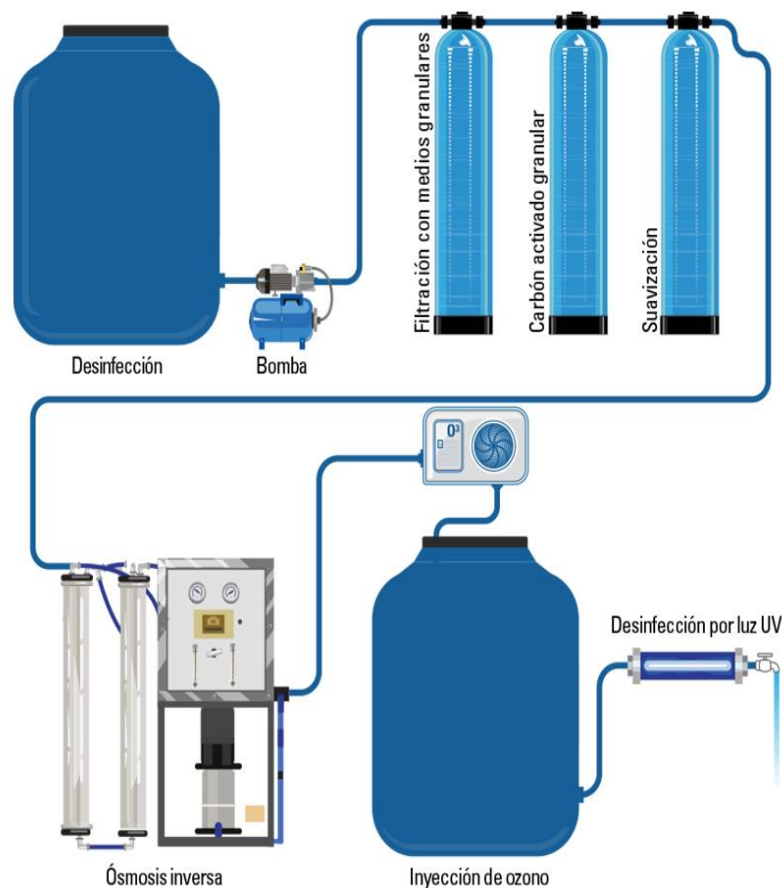


Figura 28. Etapas más comunes de un sistema de purificación de agua (Omega Air, 2021).

6.1.2 Producción de metal utilizando oxígeno industrial (hasta 95 % de pureza).

El oxígeno industrial tiene un rol importante en el procesamiento del oro y del flujo de mineral (Figura 29), reduciendo el costo del cianuro y los productos de desecho, esto es muy importante ya que, al bajar la cantidad de cianuro en la producción de metales, se reduce la emisión de desechos contaminantes. La industria del acero es el mayor usuario del oxígeno industrial y también una gran fuente de contaminación por los desechos que se producen, los generadores industriales de oxígeno también se utilizan en la producción de otros metales como el cobre y el plomo (Omega Aír, 2021).



Figura 29. Producción de metal (Au, Cu, Pb, Ag) utilizando oxígeno (Omega Aír, 2021).

6.1.3 Producción de vidrio utilizando oxígeno industrial (95 % de pureza).

Se puede lograr una mayor calidad del producto agregando oxígeno durante la fusión del vidrio (Figura 30), se mejora la eficiencia del horno de fusión, se aumenta la temperatura de la llama, se reducen los contaminantes que contienen nitrógeno y los costos de energía son más bajos (Omega Aír, 2021).

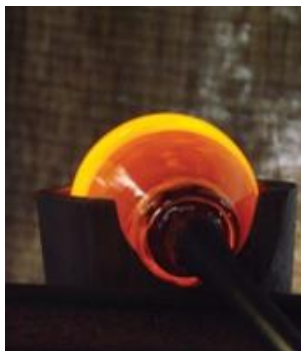


Figura 30. Producción de vidrio utilizando oxígeno (Omega Aír, 2021).

6.1.4 Lixiviación de oro y plata asistida por oxígeno industrial.

CRYOINFRA, líder nacional en la venta y servicio de gases industriales, ha desarrollado la experiencia en la optimización de procesos de lixiviación asistida con oxígeno. En cualquier planta donde se utilice la cianuración convencional para recuperar metales valiosos como son oro y plata es posible mejorar la cinética de cianuración e incrementar la velocidad de disolución logrando procesar mayor cantidad de minerales en menor tiempo, mediante la inyección controlada de oxígeno gaseoso lo anterior se logra con la instalación de difusores en el primer circuito de cianuración, ya que el oxígeno es un gran oxidante la reacción se lleva a cabo más rápido sin necesidad de añadir más cianuro de sodio. Esta simple modificación al sistema permite incrementar el nivel de oxígeno disuelto en la pulpa, por lo que se tiene un mayor contenido de oxígeno disponible para participar en el proceso de disolución (CRYOINFRA, 2022).



¿Cuándo se recomienda utilizar oxígeno en lixiviación?

- Cuando se tiene un consumo exagerado de cianuro.
- Cuando la recuperación de la plata y oro se encuentra muy baja.
- Cuando se requiera disminuir el tiempo de residencia de la pulpa.
- Cuando se desea incrementar la capacidad de producción (CRYOINFRA, 2022).

Beneficios de utilizar oxígeno en la lixiviación.

- Menor tiempo de residencia.
- Reducción de reactivo (cianuro).
- Incremento en la disolución de valores metálicos.
- Incremento de producción.
- Reducción de costos de operación.
- Inversión mínima en la implementación.
- La implementación de la aplicación se realiza en un corto tiempo (CRYOINFRA, 2022).

Consumo específico de oxígeno.

El consumo específico es de 1 a 2 Kg de oxígeno por tonelada de mineral procesado (Figuras 31 y 32) (CRYOINFRA, 2022).

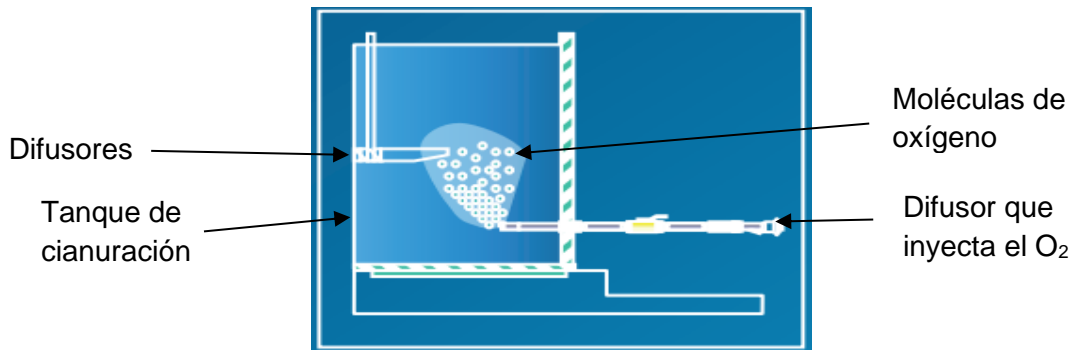


Figura 31. Inyección de oxígeno mediante difusores en el tanque de cianuración, tomada y reeditada de (CRYOINFRA, 2022).

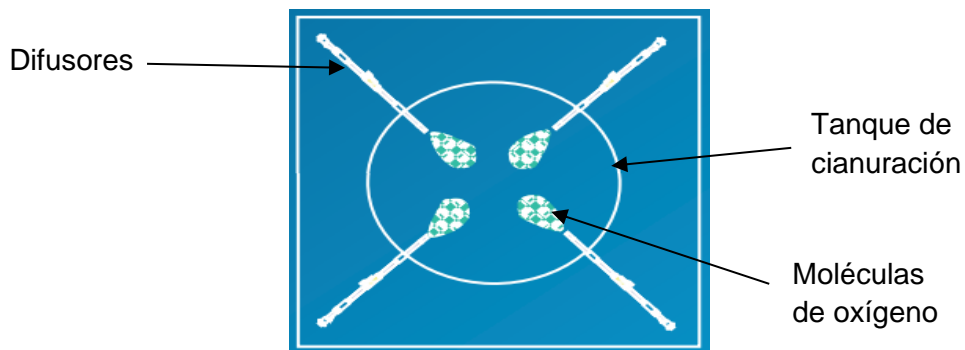


Figura 32. Distribución de 4 difusores en un tanque de cianuración, tomada y reeditada de (CRYOINFRA, 2022).

6.2 Oxígeno medicinal.

El oxígeno medicinal como producto se utiliza en todos los ámbitos de cuidados intensivos, áreas de cuidados comunes para pacientes que deben utilizarlo por prescripción médica y en quirófanos (Eliana Alfaro, 2013).

6.2.1 Clasificación de oxígeno medicinal.

- Líquido: su principal diferencia es el tamaño de su envase, en el caso del oxígeno líquido se almacena en termos y tanques criogénicos disponibles en varios tamaños dependiendo

de las necesidades del hospital. La capacidad de los tanques criogénicos varía entre 300 m³ a 3000 m³ y la capacidad de los termos es de 125 m³.

- Gaseoso: Se almacena en tubos o cilindros (Eliana Alfaro, 2013).

6.2.2. Aplicaciones del oxígeno medicinal.

6.2.2.1 Oxígeno medicinal usado en piscicultura.

Los peces necesitan niveles precisos de oxígeno en el agua para un crecimiento óptimo, por lo que el oxígeno puro debe dosificarse correctamente para garantizar un crecimiento más rápido, menos enfermedades y estrés para mantener una alta calidad. El oxígeno puro es esencial en la piscicultura moderna (Figura 33) (Omega Aír, 2021).



Figura 33. Piscifactorías (Omega Aír, 2021).

6.2.2.2 Uso de oxígeno medicinal en hospitales militares y de campaña.

Una sexta parte de las víctimas de combate generalmente necesitan oxígeno. Esto significa que un hospital de campaña con varias camas necesitaría muchos cilindros de oxígeno por día. Esto significa altos costos de transporte y problemas logísticos. La alternativa para los cilindros de oxígeno es el generador de oxígeno en el sitio que garantiza un suministro confiable y seguro de oxígeno médico de calidad continua sin los problemas y riesgos asociados con los cilindros tradicionales de alta presión (Omega Aír, 2021).

6.2.2.3 Uso médico del oxígeno medicinal.

La principal ventaja de la producción de oxígeno en sitio es la protección contra la falta de suministro. El otro factor positivo es la reducción de costos. Debido a la situación actual, la demanda global de generadores de oxígeno está creciendo rápidamente en el campo médico (Omega Air, 2021).

6.3 Aplicaciones del oxígeno en forma de ozono.

El ozono se encuentra principalmente en dos regiones de la atmósfera de la Tierra, la troposfera y estratosfera, el 90% de las moléculas de ozono se encuentran en la capa situada entre 10 - 50 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, cuya región de la atmósfera se denomina estratosfera. Este ozono estratosférico se conoce comúnmente con el nombre de "capa de ozono", el 10% de las moléculas de ozono restantes se encuentran en la troposfera, capa que se encuentra entre los 10 -18 km por encima de la superficie terrestre (Sabogal, 1998).

La capa de ozono en la estratosfera es de gran importancia en el balance ecológico del planeta ya que absorbe prácticamente toda la nociva radiación ultravioleta (UV-B) procedente del sol, la cual es extremadamente destructiva para los tejidos vivos, un exceso de radiación UV-B puede causar cánceres de la piel y cataratas, y tener efectos perjudiciales para las plantas, la productividad de los animales terrestres, marinos y repercusiones en el clima, la absorción de esta radiación depende marcadamente de la concentración de ozono la cual puede variar dependiendo de la época y el lugar geográfico (Sabogal, 1998).

6.3.1 Ozonoterapia.

La ozonoterapia o terapia con oxígeno-ozono ($O_2 - O_3$) es un tratamiento de medicina alternativa que se basa en el aumento de oxígeno y ozono en el cuerpo, el cual representa una mezcla del 95 % de oxígeno y un 5 % de ozono. El ozono se administra en pequeñas dosis y nunca por vía oral, debido a la alta toxicidad por vía inhalatoria (ALTEC, 2021).

La vía de administración del ozono depende del tipo de lesión y nunca es por vía oral. La evidencia actual sobre la efectividad de la ozonoterapia en el tratamiento de enfermedades como las hernias discales, osteoartritis de rodilla, osteonecrosis de mandíbula por bifosfonatos, para problemas músculo-esqueléticos y reumáticos, es escasa y de baja calidad metodológica. Existen otras enfermedades o desenlaces que son tratadas con ozono, siendo escasos o nulos los estudios que comprueben el efecto de la ozonoterapia (ALTEC, 2021).

6.4 ¿Qué es el coronavirus?

Los coronavirus son una familia de virus que causan enfermedades (desde el resfriado común hasta enfermedades respiratorias más graves) y circulan entre humanos y animales. En este caso, se trata del SARS-CoV-2, apareció en China en diciembre del año 2019 y provoca una enfermedad llamada COVID-19, que se extendió por el mundo y fue declarada pandemia global por la Organización Mundial de la Salud (Gobierno de México, 2022).

Los más conocidos son el Síndrome Respiratorio Agudo Severo (SARS), y el Síndrome Respiratorio de Oriente Medio (MERS-CoV). El nuevo coronavirus SARS-CoV-2 causa la enfermedad COVID-19, que puede generar padecimientos leves a graves en personas de todo el mundo (Gobierno de México, 2022).

6.4.1 ¿Cuál es la diferencia entre SARS-CoV-2 y COVID-19?

SARS-CoV-2 es el nombre del virus, mientras que COVID-19 es la enfermedad que causa este virus. Los coronavirus son una extensa familia de virus que pueden causar enfermedades tanto en animales como en humanos. En los humanos, se sabe que varios coronavirus causan infecciones respiratorias que pueden ir desde el resfriado común hasta enfermedades más graves como el síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS) y el síndrome respiratorio agudo severo (SRAS). El coronavirus que se ha descubierto más recientemente causa la enfermedad por coronavirus COVID-19 (Salud de Coahuila, 2022).

El COVID-19 es la enfermedad infecciosa causada por el coronavirus que se ha descubierto más recientemente. Tanto este nuevo virus como la enfermedad que provoca eran desconocidos antes de que estallara el brote en Wuhan (China) en diciembre de 2019. Actualmente el COVID-19 es una pandemia que afecta a muchos países de todo el mundo (Salud de Coahuila, 2022).

6.5 Oxigenoterapia.

La oxigenoterapia se define como el aporte artificial de oxígeno (O_2) en el aire aspirado; su objetivo principal es la mejoría en la oxigenación tisular, que se consigue cuando la presión parcial de O_2 (PO_2) en la sangre arterial supera los 1.16 psi, lo que corresponde aproximadamente a una saturación de hemoglobina del 90 % (Avendaño, 2020).

La oxigenoterapia es una modalidad terapéutica que pretende aumentar la presión parcial de oxígeno en sangre arterial, a través de un aumento en la concentración de oxígeno en el aire aspirado (Rodríguez Núñez, 2003).

6.5.1 Oxigenoterapia en pacientes con COVID-19.

Aunque la mayoría de las personas con COVID-19 tienen una enfermedad leve o sin complicaciones (81 %), algunas desarrollarán una enfermedad grave que requiere oxigenoterapia (14 %) y aproximadamente el 5 % requerirá un tratamiento de unidad de cuidados intensivos. En el mismo sentido, un estudio reciente describió el curso de la enfermedad de 1,009 pacientes con COVID-19 en China y mostró que el 41 % de todos los pacientes hospitalizados y más del 70 % de aquellos con enfermedad grave necesitaban oxígeno suplementario (Avendaño, 2020).

Los pacientes con COVID-19 presentan algún grado de hipoxia, lo cual ocasiona que acudan a valoración a las diferentes unidades médicas, por ello, se considera como primera estrategia efectiva la administración de oxígeno a concentraciones mayores a las del aire ambiente (21 %), para prevenir y tratar los síntomas, así como las complicaciones por la falta de suministro de oxígeno en alguna parte o en todo el cerebro (IMSS, 2020).

En general, se define a la oxigenoterapia como el uso de oxígeno con fines terapéuticos. El oxígeno para uso medicinal debe prescribirse con fundamento en una razón válida y administrarse de manera correcta y segura (IMSS, 2020).

6.5.1.1 Consecuencias que trae la falta de oxígeno en el cuerpo.

Algunas enfermedades respiratorias o cardíacas pueden generar alteraciones que terminan afectando el sistema respiratorio el cual termina siendo incapaz de dar a la sangre todo el oxígeno que ella necesita, causando hipoxemia, (falta de oxígeno en la sangre) (Organización Mundial de la Salud, 2015).

Esto tiene repercusiones en el funcionamiento de órganos tan importantes como el cerebro, el corazón, el riñón, el hígado o el sistema digestivo. La falta de oxígeno, además, aumenta los glóbulos rojos (células encargadas de transportar el oxígeno en la sangre) y esto no es conveniente porque la sangre se vuelve más viscosa y difícil de circular (Organización Mundial de la Salud, 2015).

6.5.1.2 Cuando utilizar oxígeno medicinal.

Cuando la saturación de oxígeno que es un elemento a considerar en la evolución de la enfermedad por coronavirus, este por debajo de los niveles normales (<92 %) por lo que es importante estar al tanto de ella y no perder contacto con el médico (Gobierno del Estado de México, 2022).

6.5.1.4 ¿Qué pasa si se utiliza oxígeno medicinal sin necesitarlo?

- La automedicación del oxígeno medicinal puede ser fatal pues representa un factor de riesgo de intoxicación, paro respiratorio o fibrosis pulmonar.
- Las concentraciones elevadas de oxígeno en las vías respiratorias por periodos prolongados pueden causar inflamación de estas.
- Provocaría un exceso de confianza en las personas si presentan síntomas de COVID-19, retrasando, de este modo, una atención oportuna (Gobierno del Estado de México, 2022).

6.5.1.5 ¿Por qué medir el oxígeno es clave en pacientes de COVID-19?

La oximetría es una manera indirecta para poder medir la concentración o cuánto estamos teniendo de oxigenación en nuestra sangre, es decir, qué porcentaje de la sangre transporta oxígeno. Esto se puede realizar en casa con un oxímetro, un dispositivo pequeño con una pinza incorporada para ajustarse en un dedo de la mano. Con este dispositivo puedes medir de manera rápida y sencilla tu nivel de oxigenación y determinar si necesitas buscar ayuda médica en caso de que sea menor al 92 % (Tecnológico de Monterrey, 2022).

Un pulsioxímetro puede ser la mejor opción para monitorear tus niveles de oxigenación en casa, las mayores afectaciones que el COVID-19 puede provocar es la inflamación de los pulmones, lo que podría generar una neumonía. Hay que aclarar que no es en todos los casos de COVID-19 (se presenta la neumonía). Pero cuando se presenta no se da el intercambio de oxígeno de manera correcta, y no alcanza a llegar a la suficiente concentración de oxígeno a las moléculas del organismo (Tecnológico de Monterrey, 2022).

7. NORMATIVA PARA CONSIDERAR AL OXÍGENO COMO MEDICINAL.

En la Figura 34, se describen ensayos para identificar óxido medicinal al 99.5 %, los cuales son utilizados para medir el contenido de monóxido de carbono y dióxido de carbono en la muestra de gas (Secretaría de Salud, 2014).

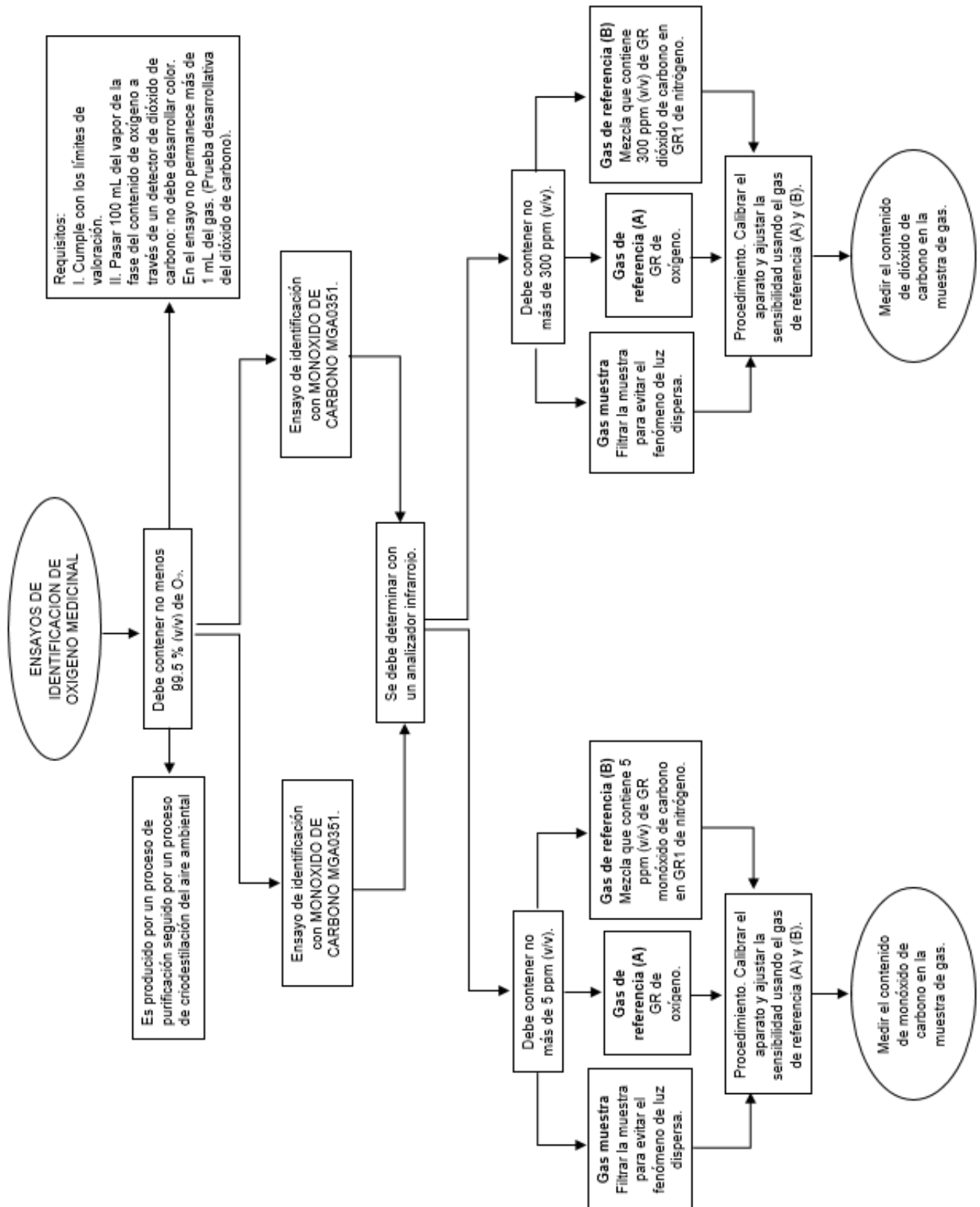


Figura 34. Diagrama de los ensayos de identificación de oxígeno medicinal (Secretaría de Salud, 2014).

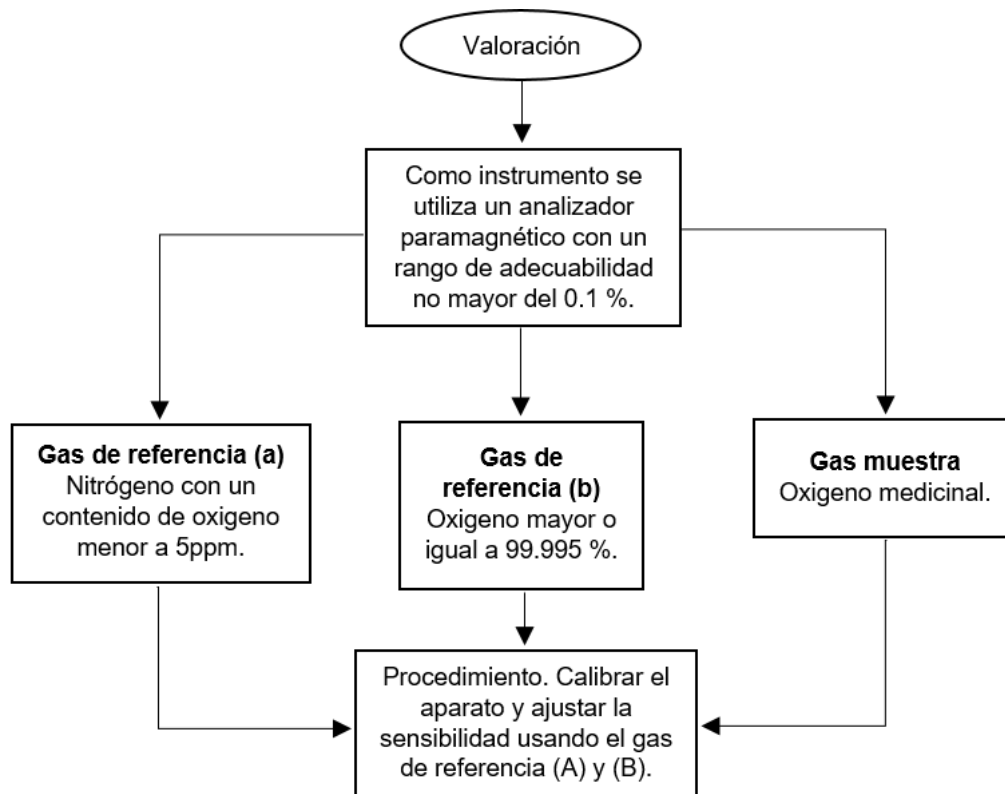


Figura 35. Valoración de oxígeno medicinal con gases de referencia (*Secretaría de Salud, 2014*).

7.1 Oxígeno al 93 %.

Especificaciones del oxígeno al 93 % extraído del aire mediante un proceso de tamizado molecular. Contiene no menos del 90.0 % y no más del 96.0 % v/v de O₂, el resto se compone principalmente de argón y nitrógeno. A 293.15 K y a una presión de 1 atm, tiene una solubilidad de 32 volúmenes de agua. El tamaño de su partícula se encuentra entre 0 - 5 micras y 2.5 micras, para ello es necesario utilizar contador de partículas láser (*Secretaría de Salud, 2018*).

7.2 Normas internacionales sobre las especificaciones del oxígeno medicinal.

En todos los países existe una normativa que rige los sistemas de canalización de gases medicinales y los aparatos que se encuentran en ellos. Estas normativas pueden tener sus propias especificaciones a nivel nacional o pueden hacer referencia a la normativa internacional para su aplicación a nivel local. Las normativas internacionales principales son la NFPA 99, cuyo uso se da con una mayor predisposición en la región de América, y la UNE-EN7396-1 que predomina en la región de Europa y sus proximidades, como se muestra en la tabla 7:

Tabla 6. Cuadro comparativo de normativas UNE-EN7396-1 y NFPA 99 (*Organización Panamericana de la Salud, 2021*).

GASES MEDICINALES MEDICAMENTOS	GASES MEDICINALES PRODUCTOS SANITARIOS	OTRO TIPO DE GASES
Sistemas de canalización de gases medicinales. <ul style="list-style-type: none"> • Fuentes de suministro. • Canalizaciones de cobre. • Reguladores de presión intermedia. • Sistemas de monitorización y alarmas. 	UNE-EN-7396-1	NFPA 99
Reguladores de presión	UNE-EN ISO 10524-1:2007	
Conexiones flexibles de botellas	UNE-EN ISO 407:2005	
Canalizaciones con mercado	UNE-EN ISO 5359:2008	
Tubos flexibles de unión		

7.3 Especificaciones que debe de cumplir el oxígeno para que sea medicinal.

El oxígeno es un gas químicamente muy activo por su carácter comburente siendo parte necesaria para la formación de otros compuestos formando reacciones exotérmicas. Esta conlleva especial cuidado al ser un producto que facilita la combustión espontánea y la detonación debido a que es un oxidante fuerte (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

El oxígeno es usado fundamentalmente en bases de mezclas por inhalación y usos respiratorios, el oxígeno suministrado al paciente deberá tener un control de tasa de flujo que dependerá del tipo del paciente y sus necesidades de oxígeno que varían de 0.2 L/min a 60 L/min. Dado que la concentración de oxígeno puede verse considerablemente reducida por una humedad relativa elevada, se debe prestar atención a la misma, esta concentración no deberá ser menor a 82 % (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

7.4 Especificaciones que debe de tener un concentrador de oxígeno, apegado a la norma ISO 8359:1996.

El concentrador deberá ser capaz de suministrar un flujo continuo de oxígeno a una concentración mayor del 82 %, los concentradores deben de activar una alarma técnica que emita una señal si se produce una concentración de oxígeno por debajo del 82 % de fracción volumen. La concentración mínima de oxígeno deberá mantenerse a la tasa de flujo máxima establecida, a

313.15 K, con un 95 % de humedad relativa y una presión atmosférica equivalente a una altitud de 2000 m sobre el nivel del mar (Organización Mundial de la Salud, 2016).

7.4.1 Control de flujo.

El concentrador de oxígeno deberá de estar equipado al menos con un flujómetro integrado con control de la tasa de flujo, si el dispositivo tiene varios flujómetros, cada uno debe contar con su propio control de la tasa de flujo. En el caso de uso pediátrico, el flujómetro tendrá que ser capaz de suministrar una tasa de flujo mínimo de al menos 0.5 L/min, la tasa de flujo máximo debería depender de las necesidades de oxígeno. Deberá de evitarse que el concentrador de oxígeno suministre una tasa mayor que la máxima establecida (Organización Mundial de la Salud, 2016).

El flujómetro deberá proporcionar un control continuo de la tasa de flujo, con marcas que vayan desde 0 L/min, hasta la tasa de flujo máximo establecida, a intervalos mínimos de 0.5 L/min. El concentrador de oxígeno deberá de ser capaz de generar como mínimo 55 kPa con todos los flujos, hasta la tasa de flujo máximo establecida (Organización Mundial de la Salud, 2016).

7.4.2 Indicadores y alarmas.

El monitor de oxígeno deberá indicar cuando la concentración de gas sea inferior a 82 %, el concentrador deberá de incorporar alarmas para alertar al usuario fallas tales como:

- concentración baja de oxígeno (<82 %)
- interrupción del flujo
- presión alta o baja
- batería baja
- corte de luz
- temperatura elevada

El concentrador de oxígeno deberá incorporar un cronómetro que registre las horas acumuladas de operación (Organización Mundial de la Salud, 2016).

7.4.3 Salidas.

El concentrador deberá tener por lo menos una toma o salida de oxígeno que pueda acoplarse directamente a la tubería para administrar el gas, las salidas deberán ser boquillas dentadas y estar empotradas o hechas de materiales que no se doblen o rompan con facilidad para evitar el daño (Organización Mundial de la Salud, 2016).

7.4.4 Caja.

- El concentrador de oxígeno deberá incorporar filtros de partículas gruesas para evitar que el polvo y la suciedad penetren en la caja y en la entrada de aire.
- Todos los filtros que puedan ser extraídos por el usuario deberán poderse limpiar. Las instrucciones de uso deberán describir la limpieza de los filtros.
- La caja deberá tener ruedas para trasladar el concentrador de oxígeno de una habitación a otra.
- El concentrador de oxígeno no deberá producir un ruido superior a los 50 decibelios cuando esté funcionando (Organización Mundial de la Salud, 2016).

8. DISTRIBUCIÓN Y SUMINISTRO DE OXÍGENO MEDICINAL.

Se consideran fuentes de oxígeno a las tecnologías que proporcionan el gas a las redes de distribución de las instalaciones sanitarias y/o de manera directa a pacientes o dispositivos. El oxígeno se puede dispensar de varias fuentes en distintos formatos, donde el tipo de suministro dependerá de la instalación sanitaria y de variables como:

- La cantidad de O₂ a ser consumida por el equipo médico de emergencia (EMT)/ sitios alternativos de atención médica (SAAM).
- La logística para el suministro del producto.
- La disponibilidad de espacios y accesos en el EMT/SAAM (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

Es importante señalar que para selección de la fuente más adecuada de O₂ para un EMT o SAAM, se debe considerar además el contexto específico de la respuesta, qué tan costo eficiente es la alternativa seleccionada y la disponibilidad del producto, las características se resumen en las siguientes tablas (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

Tabla 7. Características de las diferentes fuentes de oxígeno (*Organización Panamericana de la Salud, 2021*).

Tipo de fuentes.	Depósitos de O ₂		Generadores de O ₂	
	O ₂ comprimido en cilindros	O ₂ licuado como líquido criogénico	Concentradores de O ₂	Plantas generadoras de oxígeno
Características	<p>Dos tipos de suministro:</p> <p>Individuales- suministro directo al paciente.</p> <p>Bloques de cilindros de gran tamaño conectadas entre sí (16 a 18 cilindros).</p> <p>Presentaciones 0.5-5 L.</p>	<p>O₂ se suministra por la red de distribución, desde el depósito criogénico (fijo o móvil) hasta los puntos de uso.</p> <p>Capacidad de los tanques 1.5-40 L.</p>	<p>Dispositivo médico que concentra O₂ a través del paso de aire por tamices moleculares.</p> <p>Concentraciones para uso clínico 82-95.5%.</p> <p>Dos tipos:</p> <p>Estacionarios (2 a 5 pacientes).</p> <p>Portátiles (individuales).</p>	<p>Sistema adsorción por oscilación de presión.</p> <p>PSA (Adsorción por cambio de presión). El aire pasa por generadores de O₂ con tamices moleculares de zeolita que adsorben el nitrógeno.</p> <p>Concentración 93-95%.</p>

Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de fuentes de oxígeno (*Organización Panamericana de la Salud, 2021*).

Tipos de fuentes	Depósitos de O ₂		Generadores de O ₂	
	O ₂ comprimido en cilindros	O ₂ licuado con líquido criogénico	Concentradores de O ₂	Plantas generadoras de O ₂
Ventajas	Fácil manejo y uso.	Mayor autonomía y entrega de producto más segura. Ahorro de tiempo espacio y gas.	Fuente sostenible y costo-eficaz. Gran fiabilidad y bajo costo por comparación con otras fuentes.	Los tamices moleculares se regeneran, su vida útil es indefinida. Fácilmente escalable. Relativo bajo costo de operación. Disponibilidad permanente.
Desventajas	Se requieren planes de cambio estricto. Espacio para almacenamiento considerable. Logística de transporte.	Requiere instalaciones específicas. Costo de inversión inicial importante.	Requiere fluido eléctrico permanente para funcionamiento.	El nivel de pureza y flujo del producto puede ser variable. La instalación depende de la localización, condiciones climáticas y calidad del aire ambiente. Presencia de impurezas como el Argón.

Tabla 9. Componentes y medidas a tener con las diferentes fuentes de oxígeno (*Organización Panamericana de la Salud, 2021*).

Tipos de fuentes	Depósitos de O ₂		Generadores de O ₂	
	O ₂ comprimido en cilindros	O ₂ licuado con liquido criogénico	Concentradores de O ₂	Plantas generadoras de O ₂
Componentes		<p>Componentes mínimos:</p> <p>Recinto albergar equipos.</p> <p>Tanque criogénico.</p> <p>Sistema de gasificación.</p> <p>Cuadro eléctrico para la descarga de cisternas.</p> <p>Iluminación.</p> <p>Suministro de agua.</p>	<p>Componentes mínimos:</p> <p>Concentrador de O₂.</p> <p>Panel de control.</p> <p>Sistema de alarmas.</p> <p>Flujómetro.</p> <p>Humificador.</p> <p>Accesorios: tubería y/o mascarilla.</p>	<p>Componentes mínimos:</p> <p>Compresor de aire.</p> <p>Filtración</p> <p>Tanque de aire comprimido.</p> <p>Generador de oxígeno.</p> <p>Tanque auxiliar.</p> <p>Tanques receptores de O₂.</p>

Seguridad	<p>Evitar daños mecánicos (golpes, caídas) o físicos (calentamiento excesivo, arcos eléctricos).</p> <p>Los cilindros siempre en posición vertical.</p> <p>Áreas exclusivas de almacenamiento (seca, ventilada, señalizada, protección del sol).</p> <p>Flujos de trabajo establecidos claramente.</p>	<p>Manejo por personal especializado.</p> <p>Uso de guantes criogénicos y máscara facial transparente.</p> <p>Nunca tocar el recipiente o cañería que contenga gases criogénicos.</p> <p>Uso sólo de envases específicos.</p> <p>Mantener distancias mínimas.</p>	<p>Mantenimiento periódico (cada tres o cuatro meses).</p> <p>Verificar que la concentración de O₂ esté dentro de los límites de operación.</p>	<p>Manejo por personal especializado.</p> <p>Monitoreo continuo de concentración y nivel de pureza.</p>
-----------	--	---	--	---

Tabla 10. Usó de las diferentes fuentes de oxígeno recomendadas para EMT/SAAM (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

Tipo de fuentes	Depósitos de O ₂		Generadores de O ₂	
	O ₂ comprimido en cilindros	O ₂ licuado con líquido criogénico	Concentradores de O ₂	Plantas generadoras de O ₂
Uso EMT/ SAAM recomendado.	Consumo de O ₂ bajo o moderado. EMT triage. EMT 1 y 2. SAAM no orientado a pacientes COVID-19.	Consumo de O ₂ elevado. EMT IRAG. EMT tipo 3. SAAM orientado a atención de pacientes COVID-19 (de moderados a graves).	Consumo de O ₂ bajo a moderado. EMT triage. EMT 1 y 2. SAAM no orientado a pacientes COVID-19.	Consumo elevado. EMT IRAG. EMT tipo 3. SAAM orientado a atención de pacientes COVID-19 (de moderados a graves).

La forma de suministro de oxígeno a un establecimiento de atención médica es definida por el perfil del consumo diario, semanal y mensual (Figura 36). Estos parámetros son utilizados por los fabricantes y distribuidores de gases para definir y proponer al responsable sanitario del establecimiento, la forma óptima de suministro de gases (Infra Médigas, 2002).

Cuando se habla de suministro en forma óptima, se involucran las siguientes variables:

- Determinación del consumo promedio por semana, quincena y mes.
- Garantía de abasto por el proveedor al establecimiento.
- Rentabilidad (costo – beneficio), tanto para el usuario o consumidor de gas, como para el proveedor (Infra Médigas, 2002).



Figura 36. Diferentes tipos de contenedores para suministro de gases (*Infra Médigas, 2002*).

8.1 Tipos de contenedores para suministro de oxígeno medicinal.

Existen varios tipos de contenedores para surtir oxígeno medicinal, pero por fines de regulación los podemos clasificar en tres grandes grupos:

- Cilindros
- Termos portátiles
- Termos estacionarios.

Este tipo de cilindro está diseñado para contener oxígeno a altas presiones en forma de gas comprimido. Los cilindros son fabricados en acero al carbón o aluminio de una sola pieza y están diseñados para soportar altas presiones, tienen una válvula específica de acuerdo al gas que contienen. La válvula se protege con un capuchón o caperuza protectora. Los cilindros que contienen oxígeno se identifican por el color verde en el hombro, así como por las etiquetas con la descripción de su contenido. Además, se especifican grabando con letras de golpe en el cuerpo, las características propias del cilindro: fecha de la prueba hidráulica, fecha de fabricación y el número de serie. Si el cilindro tiene una cruz de color rojo, indica que el contenido es de calidad medicinal y no debe utilizarse en ninguna otra aplicación (Figura 37) (*Infra Médigas, 2002*).



Figura 37. Cilindros de oxígeno medicinal (Infra Médigas, 2002).

Por lo general, para suministrar oxígeno a los establecimientos médicos se utilizan cilindros de 6 a 8 m³, con presiones que fluctúan entre 150 a 200 kg/cm². Todos los cilindros están provistos de un dispositivo de alivio de presión. La válvula específica del cilindro cuenta con un dispositivo de seguridad que tiene un diafragma o una membrana que, cuando se sobrepasa la presión máxima en el interior del cilindro, se rompe (dispositivo de ruptura). Es importante mencionar que, en algunos cilindros, este dispositivo de seguridad puede estar instalado como un aditamento independiente. Una vez que el dispositivo se activa, todo el producto escapa a la atmósfera; es por ello que la central de gases siempre debe ubicarse en lugares ventilados, no debe ponerse en sótanos o lugares cercanos a ningún tipo de flama abierta o en materiales que generan bastante calor, como transformadores a calderas (Infra Médigas, 2002).

Recuerde que una concentración alta de oxígeno en el aire favorece la combustión de todos los materiales (Infra Médigas, 2002).

8.1.1 Termos portátiles para surtir oxígeno medicinal.

Los termos portátiles están constituidos por dos recipientes concéntricos con espacio anular entre ellos. El tanque interior es de acero inoxidable y el exterior puede ser construido de acero inoxidable o de acero al carbón (Figura 38). Una de las principales características de estos contenedores es que en espacio anular se hace vacío y se rellena con material aislante térmico, el que impide el paso del calor del medio ambiente al interior del termo, lo que permite mantener en estado líquido su contenido (Infra Médigas, 2002).

Al disminuir la temperatura por debajo de 456.15 K, el oxígeno se vuelve líquido a la presión atmosférica usual, al aumentar la temperatura pasa a su forma gaseosa. Por eso es importante mantener en buen estado el aislamiento térmico (Infra Médigas, 2002).

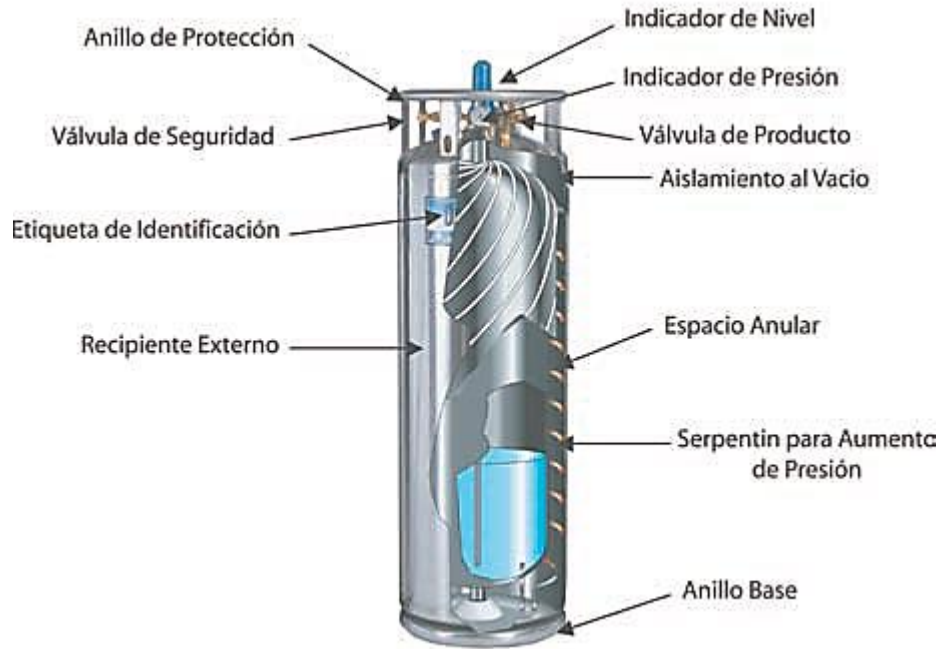


Figura 38. Principales partes de un termo portátil, incluyendo los cortes para definir su interior (Infra Médigas, 2002).

Las presiones manométricas que generalmente se manejan con estos termos portátiles son de 15.5 kg/cm^2 para el oxígeno. En cuanto a los aditamentos de seguridad, los termos cuentan con válvulas de alivio y dispositivos con membrana o diafragma de ruptura, que al accionarse por el incremento de presión permiten su control dejando escapar el gas a la atmósfera (Infra Médigas, 2002).

El incremento de presión puede producirse por calentamiento del termo portátil generando una mayor vaporización del oxígeno líquido, lo que indica que los termos deben mantenerse a baja temperatura, alejados de cualquier fuente de calor natural o artificial (Infra Médigas, 2002).

8.1.2 Termos estacionarios para surtir oxígeno medicinal.

Este sistema de suministro debe usarse cuando el consumo de oxígeno es muy alto y el proveedor no puede surtir los termos portátiles en el tiempo y cantidad que se requiere. Los termos estacionarios son recipientes utilizados para almacenar oxígeno en forma de líquido criogénico y suministrar en su forma gaseosa. El tanque constituye un recipiente interior y uno exterior o "camisa", el espacio entre los dos recipientes hace vacío y se llena con material aislante, generalmente perlita. El recipiente interior está preparado para resistir una presión máxima de 15 kg/cm^2 ; está fabricado de acero inoxidable o acero con 9 % de níquel, su función es contener el

líquido criogénico, mientras que la "camisa" exterior se fabrica en acero al carbón y su función es sostener el material de aislamiento térmico y soportar el recipiente interior (Figura 39) (Infra Médigas, 2002).

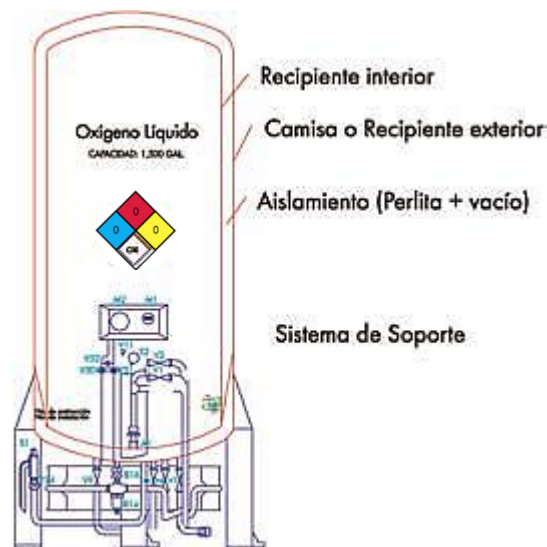


Figura 39. Principales partes funcionales del tanque criogénico (Infra Médigas, 2002).

El termo estacionario, en su componente interno, mantiene una temperatura menor a menos 456.15 K, por lo que el oxígeno permanece en estado líquido; el aislamiento se forma por el espacio anular (vacío) y la perlita.

Los sistemas que integran un termo estacionario que contiene oxígeno líquido son (Figura 40):

- Sistema de vaporización.
- Sistema de llenado.
- Sistema de seguridad.
- Sistema de soporte y fijado a la cimentación.

La configuración de las tuberías de los termos estacionarios se modifica de proveedor a proveedor (Infra Médigas, 2002).

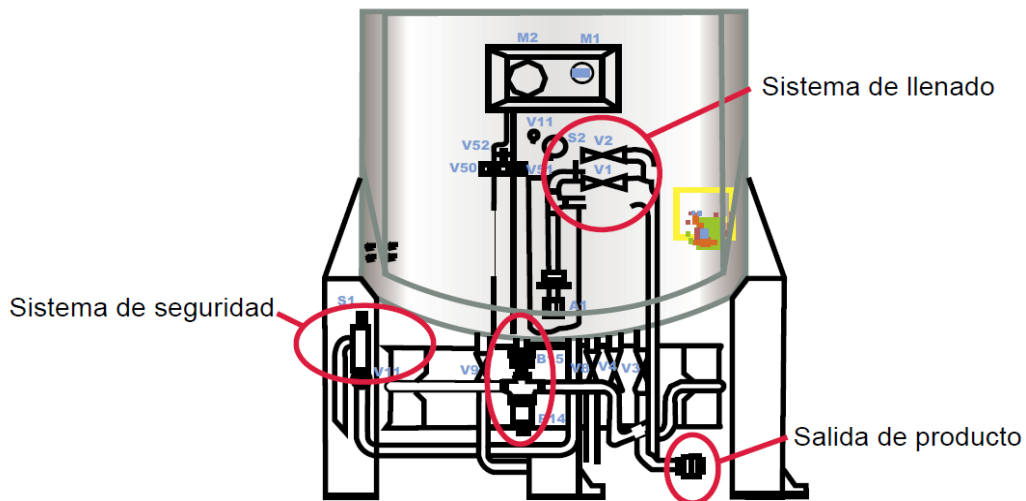


Figura 40. Parte inferior del termo estacionario (Infra Médigas, 2002).

Existen diversos fabricantes de tanques termo estacionarios, de diferentes capacidades y formas (vertical u horizontal), (Figura 41) (Infra Médigas, 2002).

Los señalamientos básicos con los que debe contar un termo estacionario son los siguientes:

- Leyenda que indique el tipo de producto que almacena.
- El cuadrángulo de seguridad, correctamente identificado.
- Capacidad de almacenamiento.
- Instrumentos de medición, correctamente identificados.
- Identificación de válvulas.
- Diagrama de operación.
- Reglas básicas de seguridad, para casos de emergencia.
- Teléfonos de emergencia.
- Leyenda con el nombre del proveedor en la parte superior.



Figura 41. Termo estacionario con su evaporador (Infra Médigas, 2002).

8.2 Seguridad y riesgos comunes en la manipulación del oxígeno.

El oxígeno es un oxidante muy fuerte y por lo tanto es un comburente muy potente. Por ello, se le puede considerar como una sustancia peligrosa y hay que tener en cuenta ciertas directrices para que su transporte, manipulación y almacenamiento sean seguros. En cuanto a su manipulación, sólo personas experimentadas y con la debida formación deben manejar gases de este tipo. La sustancia debe de ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad. La maquinaria debe de estar libre de aceites o grasas, ya que su contacto con el oxígeno podría provocar un incendio. Para esta maquinaria se emplean lubricantes específicos para oxígeno. Además, se deberán realizar con regularidad inspecciones que aseguren que no existan fugas y permitan un uso seguro (Tudela Gallardo, 2019).

En caso de una fuga, la exposición al oxígeno no suele ser peligrosa, aunque si es prolongada puede causar náuseas, vértigos, dificultades respiratorias y convulsiones. No supone ningún peligro su contacto con la piel o con los ojos, aunque en caso de inhalación se debe evacuar a la víctima hacia una zona no contaminada (Tudela Gallardo, 2019).

8.2.1 Riesgos comunes.

Los usuarios de estos productos deben comprender estos riesgos y evitarlos, para eliminar la posibilidad de que ocurran accidentes serios (Eliana Alfaro, 2013).

No es un gas inflamable, pero soporta fácilmente la combustión. Todos los materiales que son inflamables en aire arderán vigorosamente en oxígeno. Algunos combustibles como el aceite y la grasa arden con violencia casi explosiva al combinarse con oxígeno. Los cilindros con rupturas pueden proyectarse. Puede encender otros materiales combustibles (madera, papel, aceite, ropa, etc.). Todos los elementos, excepto los gases inertes, en combinación directa con oxígeno, forman óxidos (Eliana Alfaro, 2013).

8.2.2 Elementos de seguridad e identificación del oxígeno medicinal.

Código de color: verde.

H270: Puede provocar o agravar un incendio; comburente.

H280: Contiene gas a presión; puede explotar si se calienta.

Número de identificación como:

Gas comprimido: ONU - 1072

Líquido refrigerado: ONU - 1073

Clasificación por la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA por sus siglas en inglés) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT por sus siglas en inglés) 704 (Infra Médigas, 2002).



Figura 42. Rombos de seguridad de oxígeno medicinal (Infra Médigas, 2002).

Tabla 11. Comparación de los diferentes medios de almacenamiento de oxígeno (Aljaghoub, 2023).

	OXÍGENO LÍQUIDO	PLANTA PSA	CONCENTRADOR DE OXÍGENO	CILINDROS
Descripción	Producción de oxígeno líquido fuera del sitio y almacenado en el centro médico.	Generación de oxígeno insitu mediante tecnología PSA.	Un dispositivo médico autónomo alimentado eléctricamente diseñado para la concentración de oxígeno.	Un recipiente de almacenamiento cilíndrico recargable utilizando para el almacenamiento y transporte de oxígeno.
Electricidad	No	Si	Si	No
Mantenimiento	Significativo	Significativo	Moderado	Limitado
Distribución	Sistema de distribución por tubería central.	Sistema de distribución por tubería central.	Directo a las áreas de los pacientes.	Directo a las áreas de los pacientes.
Ventajas	Salida de oxígeno alta.	Continuo rentable suministro de oxígeno.	Suministro de oxígeno que puede ser dividida entre varios pacientes.	Sin fuente de alimentación.
Desventajas	Requiere transporte cadena de suministro. Necesita infraestructura. Alto mantenimiento de tuberías. Riesgo de fugas. Requiere cilindros como respaldo.	Alta inversión de capital. Necesita infraestructura y poder ininterrumpido. Alto mantenimiento para tubería. Riesgo de fuga. Requiere cilindros de respaldo.	Baja presión de salida. Requiere fuente de alimentación ininterrumpida. Requiere cilindros como respaldo.	Requiere transporte/cadena de suministro. Altamente dependiente del proveedor. Riesgo de fuga.

8.3 Cilindros de gas comprimido.

Los cilindros de gas comprimido tienen ciertas diferencias en comparación con los concentradores de oxígeno y se resumen en la tabla 13.

Tabla 12. Diferencias entre concentradores de oxígeno y cilindros de gas comprimido (Hardavella, 2019).

	CONCENTRADORES DE OXÍGENO	CILINDROS DE OXÍGENO COMPRIMIDO
Fuente de alimentación requerida.	Si, de forma continua (según modelo 100-600 W).	No
Transporte necesario	Solo en el momento de instalación.	Si, regularmente; pesado y costoso de transportar
Suministro de oxígeno agotable	No, suministro continuo mientras la energía permanezca ininterrumpida.	Si, según el tamaño, la presión de almacenamiento y las necesidades del paciente.
Cuidado	Moderado: limpieza de los filtros y el exterior del dispositivo, y minimizar el riesgo de incendio.	Mínimo: control regular, minimiza el riesgo de incendio (sin grasa ni inflamables).
Costos operativos	Pequeño: electricidad y mantenimiento.	Alta: recarga de cilindros y transporte desde la estación de (recarga a un hospital).
Mantenimiento	Moderado: comprobar si hay baja producción de oxígeno con analizador.	Moderado: verifique si hay fugas de presión con un manómetro.

8.3.1 Propiedades, clasificación y apariencia.

Un cilindro es un recipiente de metal lleno de gas comprimido mantenido a alta presión. Los cilindros de oxígeno están disponibles en una variedad de tamaños que determinan la capacidad de oxígeno. Para los cilindros de oxígeno comprimido, existen tres formas de suministro de oxígeno: un cilindro portátil, un cilindro liviano y un cilindro de llenado doméstico (Hardavella, 2019).

Cuando están completamente llenos de oxígeno los cilindros van desde pequeños cilindros portátiles para uso ambulatorio (medidas 53 cm de altura, 3 kg de peso, 430 L de oxígeno), hasta grandes cilindros estáticos (medidas 71 cm de altura, 18 kg de peso, 2122 L de oxígeno). Los cilindros de oxígeno están codificados por colores con un cuerpo blanco para distinguirlos de otros gases médicos (Hardavella, 2019).

8.3.2 Funcionamiento de los cilindros de oxígeno comprimido.

Un regulador está conectado a la parte superior del cilindro y funciona como un grifo, lo que permite un ajuste seguro del caudal de oxígeno suministrado en L/min. Cuando el grifo se abre manualmente, el oxígeno toma la línea de menor resistencia para el paciente a través de un dispositivo de suministro de oxígeno (tubo con máscara o cánula nasal). Una lectura de presión (barómetro) muestra la presión de oxígeno restante en el cilindro, para estimar la cantidad de oxígeno disponible para el suministro (Hardavella, 2019).

La capacidad de un cilindro de oxígeno comprimido es comparativamente baja, con una presión de llenado de 200 bar y 400 L de oxígeno, el suministro de oxígeno del paciente será suficiente durante 2.5 h, dependiendo del caudal (Hardavella, 2019).

En casa o en el hospital, el proveedor del gas cambia los cilindros, la frecuencia de las entregas depende del tamaño del cilindro y del consumo de oxígeno, los cilindros de llenado doméstico se pueden rellenar con un concentrador de oxígeno (Hardavella, 2019).

En comparación con el flujo de oxígeno continuo, los dispositivos de conservación de oxígeno administran oxígeno pulsado solo durante la inspiración, activado por la inspiración del paciente. Estos sistemas de suministro de oxígeno de “demanda” permiten que los cilindros duren más ya que se reduce el desperdicio de oxígeno durante la expiración. Se ha demostrado que los conservadores pueden reducir el uso de oxígeno en un 50 %, lo que reduce el número de partos en el hogar y por lo tanto reduce los costos (Hardavella, 2019).

Sin embargo, los dispositivos de conservación de oxígeno varían en su capacidad para mantener los niveles de saturación de oxígeno arterial durante el ejercicio, y algunos pacientes tienen dificultades para activarlos debido a la etapa avanzada de su enfermedad pulmonar (LINDE, 2023).

9. INCREMENTO DEL CONSUMO DE OXÍGENO MEDICINAL DEBIDO A LA PANDEMIA DE COVID-19.

Las pandemias exponen cualquier falla en los sistemas médicos globales, especialmente aquellos con largas y elaboradas cadenas de suministro, la producción y el transporte de oxígeno se encuentran actualmente a la vanguardia de los productos médicos más destacados y proporcionar cantidades suficientes, durante la pandemia de COVID-19 se demostró una lucha importante, ya que la demanda de oxígeno durante la pandemia aumento muchas veces, el consumo de oxígeno en los Estados Unidos y Europa en el año 2020 experimento un aumento alrededor del 158 %, otros países menos desarrollados informaron que se dio una lucha genuina con suministros de oxígeno insuficientes (Aljaghoub, 2023).

En los primeros meses del 2020, se presentaron diversas manifestaciones en medios de comunicación y redes sociales sobre la falta de oxígeno medicinal y su alza desmedida de precios, así como se informó de las acciones realizadas por la Procuraduría Federal de Consumidor (Profeco) y la Comisión Federal de Competencia Económica (COFECE), relacionadas con la supervisión y vigilancia de establecimientos dedicados a la venta y renta de tanques de oxígeno como la venta de concentradores de oxígeno. De lo anterior, publicaron que la venta y renta de tanques y concentradores de oxígeno medicinal aumentó 20 % en el comercio virtual durante el año 2020. Con base en los precios de la Ciudad de México, la Procuraduría Federal del Consumidor, ha registrado diversas alzas, tanto en el comercio virtual como en el físico; sin embargo, en el primero es donde se registra el mayor incremento (Blanch México, 2021).

Asimismo, se informó que la renta de un tanque de 680 litros se podía adquirir en internet en 1,226 pesos en la primera semana de agosto de 2020; en el año (2021) se adquiere en 1,468 pesos, una diferencia de 242 pesos, equivalentes a un incremento de 20 %. La venta de concentradores de oxígeno registró un aumento de 7 % al pasar de 47,058 a 50,380 pesos, una diferencia de 3,332 pesos. En el comercio físico se registró un aumento de 5 %, durante enero del 2021 en la recarga de tanques de oxígeno con capacidad de hasta 680 litros. Y apenas 2 % más (94 pesos) en la venta de tanques de 680 litros. Por otra parte, de acuerdo con el periódico Milenio, en el año 2021 los concentradores de oxígeno en México estuvieron disponibles para venta en línea y sus precios rondaron entre los 20,000 y los 80,000 pesos, dependiendo de la marca y el tamaño (Blanch México, 2021).

De acuerdo con el reporte de Profeco, en el año 2020 se registró un aumento de precio del oxígeno medicinal del 4.5 % y en los primeros días de 2021, ante el repunte de contagios de COVID-19 en México hubo una segunda alza, también de 4.5 %. Aunado a dicha afirmación, se informó que *"una recarga de oxígeno medicinal cuesta en todo el país, para un tanque de 10,000 litros, \$855.00*

pesos y la renta del tanque de esa misma capacidad, es de \$595.00" mientras que un concentrador para producir oxígeno oscila entre los 27,000 pesos. La autoridad Investigadora de la Comisión Federal de Competencia Económica, ya había emprendido en julio de 2020 una investigación de oficio identificada con el número de expediente IO-001-2020 aún no hay resultados), por la posible realización de prácticas monopólicas relativas en el mercado de la producción, distribución y comercialización de oxígeno medicinal y servicios relacionados en el territorio nacional, con el objetivo de suprimir conductas que pudieran estar inhibiendo la sana competencia y la libre concurrencia para el abastecimiento de oxígeno medicinal en el mercado (Blanch México, 2021).

En nuestro país se generó una sobredemanda de oxígeno medicinal, haciendo que se tenga que buscar por los particulares a través de todos los medios posibles y a su alcance, inclusive en redes sociales como Facebook, con solicitudes de préstamo o compraventa de tanques de oxígeno. Asimismo, hacia finales del 2020, la Procuraduría Federal del Consumidor, realizó visitas de verificación a empresas donde se vende oxígeno medicinal encontrando diversas anomalías. Teniendo como resultado la suspensión de seis establecimientos de venta de oxígeno, cuatro de la Ciudad de México, uno de Jalisco y otro del Estado de México. Si bien la Procuraduría Federal del Consumidor ha realizado diferentes operativos en establecimientos dedicados a la venta de oxígeno medicinal con la finalidad de verificar precios, la realidad es que la constante demanda de tanques y de dicho gas ha abierto la puerta para seguir lucrando a costa de una desesperación y sufrimiento de miles de personas. Razón por la cual, se vuelve fundamental que las autoridades encargadas de evitar este tipo de abusos refuercen sus facultades de vigilancia y de sanción, adicionalmente en intensificar campañas informativas que permitan a la ciudadanía contar con mayores herramientas e información útil (Blanch México, 2021).

Por más que el procurador del consumidor Ricardo Sheffield (Profeco) diga que hay suficiente abasto, la realidad es que, en 2021 en la Ciudad de México durante la pandemia de COVID-19 fue escaso y muy caro el reparto de O₂ en pacientes COVID-19 que se mantenían en su domicilio. Aparte están los innumerables pacientes COVID-19 abrazados a su tanque (pagado por la familia) que hicieron filas por días en salas de urgencias implorando un lugar con la esperanza de pasar los filtros cada vez más estrechos. Así, la fuerte ola de contagios surgidos del 2020 al 2021 la insuficiencia de espacio en hospitales y que no se dieran abasto los proveedores de tanques rentados y entregas a domicilio, detonaron un irregular y caótico mercado de oxígeno medicinal (El economista, 2021).

9.1 Principales industrias productoras de oxígeno medicinal en México.

Solo cuatro empresas concentraron la venta de oxígeno medicinal e industrial al gobierno federal, las cuales fueron INFRA, INFRA del Sur y CRYOINFRA que forman parte del mismo grupo, sumando con ellos a Praxair, las cuales sumaron 2 mil 73 millones de pesos en contratos durante el 2020. (Animal Politico, 2021).

Las empresas INFRA, INFRA del Sur y CRYOINFRA forman parte del Grupo INFRA, y sólo en el 2020 ganaron 1,777 millones de pesos por vender oxígeno a 15 instituciones como el IMSS, ISSSTE, SEDENA, Secretaría de Salud, Hospitales de especialidad, el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición, hasta Laboratorios de Biológicos o Reactivos de México (BIRMEX), entre otros. El IMSS pagó 762 millones de pesos para abastecer oxígeno medicinal en todas sus unidades hospitalarias de enero a diciembre del 2020, pero eso significó 38 % más del presupuesto que el Instituto tenía permitido para la compra. Para esta adquisición, el IMSS lanzó la licitación LA-050GYR019-E358-2019 que declaró desierta el 31 de diciembre de 2019 porque las empresas INFRA, INFRA del Sur, CRYOINFRA y Praxair “rebasaron significativamente el techo presupuestal”. Pero 8 días después las mismas cuatro empresas obtuvieron los contratos a través de la adjudicación directa AA-050GYR019-E3-2020 por un monto similar al que ofertaron inicialmente (Animal Politico, 2021).

La Secretaría de Salud Federal, emitió el acuerdo por el que se establece como una acción extraordinaria en materia de salubridad general en todo el territorio nacional, que la producción de oxígeno medicinal para consumo humano es de carácter prioritario. El mismo, tiene como objeto que la producción y distribución del oxígeno medicinal para consumo humano, sea considerado prioritario para las empresas que lo producen y distribuyen, respecto de cualquier otro producto o servicio que presten, a fin de que se garantice la disponibilidad de dicho producto y a todas las personas que lo necesiten, en todo el territorio nacional. Del mismo modo, se establece que las autoridades competentes deberán verificar que las empresas correspondientes den cumplimiento a lo señalado previamente, incluyendo la vigilancia sobre el precio del oxígeno medicinal, a efecto que no se produzcan abusos que encarezcan los costos de este (Comisión de Salud, 2021).

La demanda desmesurada de O₂ ha impulsado también la operación intensa de pequeños expendios que recargan cilindros portátiles, así como de los grandes que sólo deberían ser usados en hospitales. En El Valle de México ya hay todo un mercado negro sin control que incluso se abastece de tanques robados en empresas u hospitales, los cuales llegan a venderse ilegalmente hasta en decenas de miles de pesos. Aparte están las prácticas monopólicas en producción, distribución y venta de oxígeno medicinal en todo el país que la Comisión Federal de Competencia

ya había advertido. Es sabido que las dominantes proveedoras de oxígeno en el país son Grupo Infra y Praxair, aunque ahora han llegado las chinas con dispositivos de menor calidad que en vez de ayuda pueden ser de alto riesgo porque no generan la presión necesaria (El economista, 2021).

9.2 Hospitales que se quedaron sin oxígeno.

Para los hospitales el problema es que no estaban preparados para tal aumento exponencial en la demanda de oxígeno. De los 3 a 5 L/min que se ocupan normalmente en un paciente, para los de COVID-19 se requiere de 15 hasta 40 L/min y en casos graves hasta 60 L/min. Hay hospitales más viejos cuyas instalaciones no permiten suficiente presión o no tienen tanques suficientemente grandes y agotan su abasto de O₂ muy rápido, algo demasiado riesgoso porque se ven obligados a bajar la presión cuando para los pacientes es de vida o muerte (El economista, 2021).

En México solo tres empresas pueden suministrar oxígeno medicinal según la Procuraduría General del Consumidor las cuales son; Infra, Medigas y Criogas son las únicas empresas autorizadas para la venta de oxígeno medicinal (Comisión de Salud, 2021).

9.3 Producción de oxígeno de la empresa CRYOINFRA en México antes y durante la pandemia COVID 19.

9.3.1 Volumen de Producción y Comercio Exterior de oxígeno, antes de la pandemia COVID-19.

El volumen de producción en el año 2019 decreció el 1.8 % (Tabla 14), respecto al año anterior; mientras que, las importaciones aumentaron 23.6 %, al igual que las exportaciones las cuales presentaron un avance de 29.2 %, en consecuencia, el Consumo Nacional Aparente decreció el 0.6 %, respecto al año anterior (ANIQ, 2019).

Tabla 13. Producción de oxígeno en toneladas, antes de la pandemia (ANIQ, 2019).

PRODUCCIÓN DE OXÍGENO (TONELADAS), ANTES DE LA PANDEMIA COVID-19.			
	2017	2018	2019
PRODUCCIÓN	1,390,005	1,505,068	1,495,062
IMPOTACIONES	9,983	6,562	8,113
EXPORTACIONES	4,893	4,120	5,322
CONSUMO NACIONAL APARENTE	1,395,095	1,507,510	1,497,853

9.3.2 Valor de la Producción y Comercio Exterior.

El valor de la producción en el 2019 incrementó el 3.7 %, en contraste con el año anterior; asimismo, las importaciones y exportaciones presentaron avances de 16 % y 22.5 % (Tabla 15) respectivamente, mientras que el Consumo Nacional Aparente decreció el 3.7 % (ANIQ, 2019).

Tabla 14. Producción de oxígeno en miles de dólares, antes de la pandemia (ANIQ, 2019).

PRODUCCIÓN DE OXÍGENO (MILES DE DOLARES).			
	2017	2018	2019
PRODUCCIÓN	102,821	129,074	124,251
IMPOTACIONES	957	1,307	1,516
EXPORTACIONES	695	779	954
CONSUMO NACIONAL APARENTE	103,082	129,601	124,813

9.3.3 Volumen de producción y Valor de Ventas de oxígeno, antes de la pandemia COVID-19.

El valor de las ventas internas de oxígeno en el 2019 decreció el 1.8 % (Tabla 16), respecto con el año anterior; mientras que, el volumen de producción bajo el 3.7 % (ANIQ, 2019).

Tabla 15. Volumen y valor de las ventas de oxígeno, antes de la pandemia (ANIQ, 2019).

VOLUMEN Y VALOR DE LAS VENTAS DE OXÍGENO			
	2017	2018	2019
VOLUMEN DE LAS VENTAS (TONELADAS).	1,390,007	1,505,068	1,495,062
VALOR DE LAS VENTAS (MILES DE DÓLARES).	102,845	129,074	124,251

9.3.4 Volumen de Producción y Comercio Exterior de oxígeno, durante la pandemia de COVID-19.

El volumen de producción en el año 2021 creció el 6.7 %, respecto al año anterior; mientras que, las importaciones cayeron 197.5 % (Tabla 17); contrario a las exportaciones las cuales presentaron un avance de 275.1 %, en consecuencia, el Consumo Nacional Aparente presentó variación del 7.9 % (ANIQ, 2022).

Tabla 16. Producción de oxígeno en toneladas, durante la pandemia (ANIQ, 2022).

PRODUCCIÓN DE OXÍGENO (TONELADAS), DURANTE LA PANDEMIA COVID-19.		
	2020	2021
PRODUCCIÓN	1,460,125	1,557,965
IMPORTACIONES	14,503	43,152
EXPORTACIONES	5,661	15,571
CONSUMO NACIONAL APARENTE	1,468,967	1,585,546

9.3.5 Valor de la Producción y Comercio Exterior.

El valor de la producción en el 2021 decreció el 26.6 %, en contraste con el año anterior; sin embargo, las importaciones y exportaciones presentaron avances de 50.9 % y 303.3 % (Tabla 18) respectivamente, mientras que el Consumo Nacional Aparente decreció el 24.7 % (ANIQ, 2022).

Tabla 17. Producción de oxígeno en miles de dólares, durante la pandemia (ANIQ, 2022).

PRODUCCIÓN DE OXÍGENO (MILES DE DÓLARES)		
	2020	2021
PRODUCCIÓN	106,325	134,646
IMPORTACIONES	2,614	3,944
EXPORTACIONES	980	3,958
CONSUMO NACIONAL APARENTE	107,959	134,632

9.3.6 Volumen y Valor de Ventas.

El valor de las ventas internas de oxígeno en el 2021 creció 6.6 %, respecto con el año inmediato anterior; mientras que, el volumen de producción aumentó 26.4 % (Tabla 19) (ANIQ, 2022).

Tabla 18. Volumen y valor de las ventas de oxígeno, durante la pandemia (ANIQ, 2022).

VOLUMEN Y VALOR DE LAS VENTAS DE OXÍGENO DURANTE LA PANDEMIA.		
	2020	2021
VOLUMEN DE LAS VENTAS (TONELADAS).	1,460,125	1,556,475
VALOR DE LAS VENTAS (MILES DE DÓLARES).	106,325	134,402

En la Figura 43, podemos apreciar la comparación del volumen de ventas en toneladas de oxígeno antes y durante la pandemia COVID-19, notando que el año que se vendió mayor cantidad de oxígeno fue en el 2021, ya que fue cuando los contagios de COVID-19 tuvieron un repunte, ocasionando mayor demanda de oxígeno.

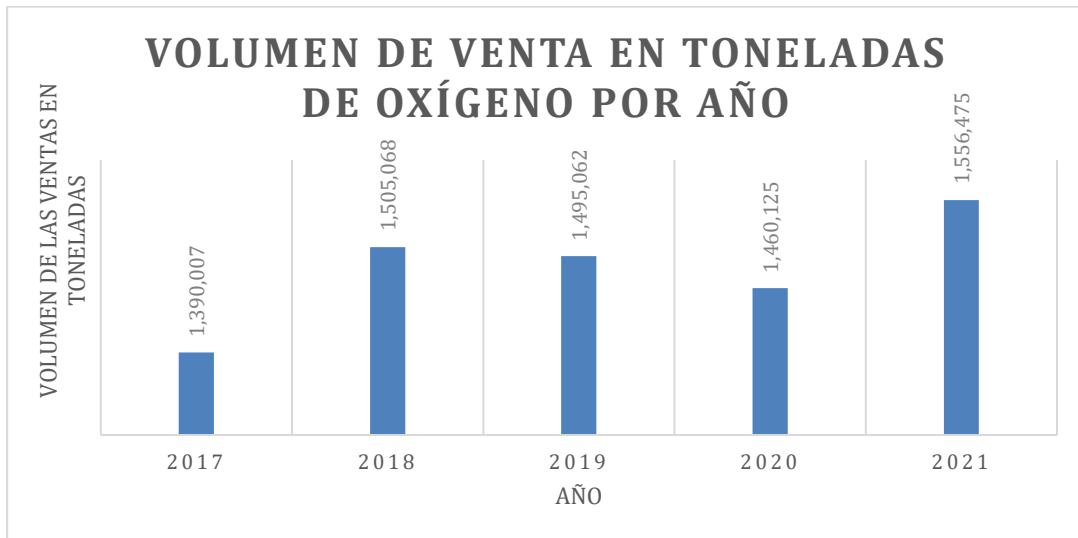


Figura 43. Gráfica de comparación de las ventas de oxígeno por toneladas antes y durante la pandemia COVID-19.

En la Figura 44, encontramos la comparación del volumen de ventas de oxígeno en dólares y nos podemos percatar que de igual manera a la producción de oxígeno; el año 2021 fue el que presentó mayor ventas y mayor ingreso en dólares, esto se debe principalmente al alza en los contagios que se dio en ese año, lo que ocasionó la alta demanda de oxígeno y por ende el alza en el precio del gas medicinal.

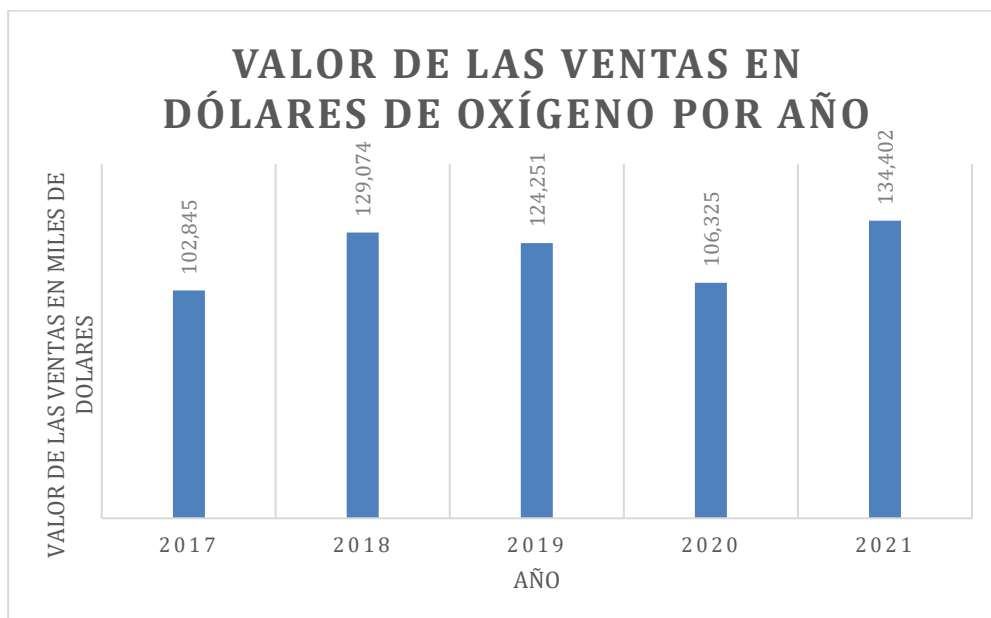


Figura 44. Gráfica del valor de las ventas de oxígeno antes y durante la pandemia de COVID-19.

10. ACCIDENTES OCURRIDOS POR MALA MANIPULACIÓN DE OXÍGENO A CAUSA DEL PÁNICO POR LOS ESCASES DEL GAS EN LA PANDEMIA DE COVID-19.

1. Auto explota por traer un tanque de oxígeno.

“Un auto que fue chocado por otro vehículo en Colorado Springs, Estados Unidos, se incendió y cuando los equipos de emergencia acudieron para sofocar las llamas, éste explotó. Los curiosos, que se acercaron a ver el accidente, fueron tomados por sorpresa cuando el auto estalló lanzando algunos fragmentos al aire. Las autoridades informaron que las detonaciones se debieron a tanques de oxígeno que se encontraban en la cajuela de uno de los autos” (Atracción 360, 2021).

2. Explota tanque de oxígeno de paciente de COVID.

“Causa cilindro de oxígeno una explosión dentro de una vivienda ubicada en la colonia Benito Juárez. Venturosamente, el paciente que empleaba el tanque junto con un sistema de inhalación resultó con lesiones menores; sin embargo, fue trasladado a un centro médico particular en la zona. Los hechos se registraron en la céntrica calle de Jalapa, donde, presuntamente, el usuario emplea el tanque junto con un sistema para inhalación a causa de una insuficiencia respiratoria causada, al parecer, por coronavirus. El mal estado del tanque, así como de los mecanismos para su conexión no se encontraban bien colocados, por lo que, presuntamente, provocó la salida del elemento químico y con ello un fuerte estallido. Al parecer, la presión de salida del oxígeno no era la correcta por lo que el sistema conectado se proyectó contra el paciente, así como diversos objetos que se encontraban en la habitación donde se mantenía en confinamiento el usuario” (El sol de Hidalgo, 2021).

3. Estalla local de tanques de oxígeno en Iztapalapa (9 abril 2021).

“Una mujer fallecida de alrededor de 37 años, quien era trabajadora del lugar, personas atendidas por crisis nerviosas, y 150 vecinos evacuados momentáneamente fue saldo de la explosión que ocurrió en un establecimiento de venta de tanques de oxígeno medicinal e industrial ubicado en la planta baja de un inmueble de dos niveles, que en su fachada estaba pintado de color azul, el logotipo y nombre del Grupo Infra, fue acondicionado para la venta del oxígeno medicinal e industrial, con lo que había sustancias como etanol, acetileno y helio, en la avenida Hidalgo, colonia Jacarandas, en Iztapalapa, señalaron las Secretarías de Seguridad Ciudadana (SSC) y de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRyPC) capitalinas” (La jornada San Luis, 2021).

4. Tragedia en la India: mueren 22 pacientes COVID por accidente con suministro de oxígeno.

“La muerte de 22 pacientes con COVID-19 fue registrada en un hospital de Maharashtra, en la India, después de que les cortaran el suministro de oxígeno suplementario. Dichos pacientes se hallaban conectados a ventiladores por donde fluía el oxígeno, hasta que se presentó una fuga en uno de los tanques y ésta provocó el corte al suministro. Según la información actual, 22 personas han muerto en el hospital municipal de Zakir Hussain, indicó el administrador del distrito de Nashik, Suraj Mandhare. El hospital en donde ocurrió, el Centro Médico Zakir Hussain, ubicado en el distrito Nashik, es un sitio dedicado especialmente a la atención de pacientes COVID. Maharashtra se considera el epicentro de la enfermedad en el país, con casi 4 millones de casos confirmados en poco más de un año” (Reporte Indigo, 2021).

5. Al menos 82 personas han fallecido en un incendio en un hospital que trata a pacientes con coronavirus en la capital de Irak, Bagdad.

“Más de 100 personas resultaron heridas en el incendio, que se produjo en el hospital Ibn Khatib el sábado por la noche. Un accidente provocó la explosión de un tanque de oxígeno, lo que desencadenó el incendio, según las informaciones que llegan de la zona. Vídeos difundidos en las redes sociales muestran a los bomberos luchando por extinguir las llamas mientras la gente huye del edificio” (RT, 2021).

6. Máquina de resonancia magnética 'absorbe' un tanque de oxígeno y mata al paciente durante su escaneo.

“Un hombre de 60 años murió en Corea del Sur cuando un tanque de oxígeno fue repentinamente absorbido por la máquina de resonancia magnética en la que estaba siendo escaneado y se estrelló contra él. El paciente se encontraba internado en un hospital de la ciudad de Gimhae, en estado crítico, tras sufrir convulsiones” (BBC News Mundo, 2021).

11. CONCLUSIONES.

Se realizó una recopilación de información que nos llevó a describir como fue el origen del oxígeno en la tierra y como empezó la producción natural por medio de las cianobacterias.

Se describieron los principales métodos de producción del oxígeno que tuvieron mayor importancia durante la pandemia de COVID-19, obteniendo que el método por sistema criogénico (licuefacción) obtiene una mayor calidad y cantidad en un plazo más corto de tiempo de producción, con menos inversión de energía y menos recursos, ya que debido a la alta demanda de oxígeno estaba siendo indispensable en la vida de muchos pacientes.

Se recopiló información sobre los principales contaminantes del medio ambiente que se forman a causa del oxígeno cuál es su toxicidad y daño a la salud, así como su formación y como repercuten directa o indirectamente en el medio ambiente.

Además, se analizaron las principales propiedades que debe de tener el oxígeno para poder ser suministrado a pacientes y las principales diferencias entre el oxígeno medicinal e industrial, se realizó la comparación de las propiedades, ventajas y desventajas de los diferentes dispositivos de suministro de oxígeno.

Se revisaron las normas internacionales y nacionales que debe de cumplir el oxígeno para ser utilizado con fin médico, así como las características que debe de cumplir un concentrador de oxígeno para poder ser utilizado como suministro de oxígeno a pacientes ya que este dispositivo cobro mucha relevancia debido a la sobredemanda de oxígeno en la pandemia de COVID-19.

Se investigaron los diferentes usos y aplicaciones del oxígeno dependiendo de sus características ya sea industrial o medicinal, ya que el oxígeno industrial tiene una variedad de aplicaciones sin embargo la mayor cantidad de oxígeno industrial producido a nivel mundial es usado en la industria siderúrgica mientras que el oxígeno medicinal es más usado en tratamientos y terapias.

Se revisaron cuáles fueron las principales empresas productoras de oxígeno durante el tiempo de la pandemia siendo PRAXAIR, LINDE e INFRA las que aumentaron su producción y fueron las únicas empresas autorizadas para la venta y suministro ya que se estaba distribuyendo oxígeno de manera informal con especificaciones que no correspondieron para uso medicinal si no que era de calidad industrial.

12. BIBLIOGRAFÍA.

- Adhikari, B. (2021). *Technoeconomic analysis of oxygen-nitrogen separation for oxygen enrichment using membranes*. Idaho: ELSEVIER.
- Alamy. (2023, Agosto 20). *Termo de Dewar*. Retrieved from Termo de Dewar: <https://www.alamy.es/imagenes/dewar-container.html?imgt=8&sortBy=relevant>
- Aljaghoub, H. (2023). "Comparative analysis of various oxygen production techniques using multicriteria decision-making methods. United Arab Emirates: International Journal of Thermofluids.
- ALTEC. (2021, Julio 20). *Aplicaciones industriales del oxígeno industrial*. Retrieved from Aplicaciones industriales del oxígeno industrial: <https://www.altecdust.com/blog/item/43-aplicaciones-industriales-del-oxigeno-industrial>.
- Animal Politico. (2021, Mayo). *Cuatro empresas concentran la venta de oxígeno a la Federación ganan 2 mil MDP en 2020*. Retrieved from Cuatro empresas concentran la venta de oxígeno a la Federación ganan 2 mil MDP en 2020: <https://www.animalpolitico.com/2021/01/empresas-concentran-venta-oxigeno-federacion/Tirant lo>
- ANIQ. (2019, Enero). *Anuario estadístico de la industria química, Gases industriales*. Retrieved from Anuario estadístico de la industria química, Gases industriales: <https://aniq.org.mx/anuario/2019/Capitulo15/oxigeno.html>
- ANIQ. (2022, Enero). *Anuario estadístico de la industria química, Gases industriales*. Retrieved from <https://aniq.org.mx/Anuario/2022/Capitulo15/oxigeno.html>
- Atracción 360. (2021, Noviembre). *Auto explota por traer un tanque de oxígeno*. Retrieved from Auto explota por traer un tanque de oxígeno: <https://www.atraccion360.com/auto-explota-por-traer-un-simple-tanque-de-oxigeno>
- Avendaño, C. (2020). *Oxigenoterapia en pacientes adultos positivos para COVID-19*. Buenos Aires: Global Healthcare.
- Barahona Fallas, A. (2017). *Simulación de una planta de separación de aire para la producción de oxígeno y nitrógeno*. San José: Univerci.
- BBC News Mundo. (2021, Diciembre). *Máquina de resonancia magnética adsorbe un tanque de oxígeno y mata al paciente durante su escaneo*. Retrieved from Máquina de resonancia magnética adsorbe un tanque de oxígeno y mata al paciente durante su escaneo: <https://actualidad.rt.com/actualidad/407801-hombre-muere-tanque-oxigeno-resonancia-magnetica>.
- Blanch México. (2021, Junio). *Producción y distribución de oxígeno medicinal*. Retrieved from Producción y distribución de oxígeno medicinal: <https://tirant.com/mx/actualidad-juridica/noticia-produccion-y-distribucion-de-oxigeno-medicinal/>.
- Boldrini, M. (2019). *Generador de oxígeno para uso hospitalario- PSA- Adsorción por variación de presión*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Mar de Plata.
- Brimblecombe, P. (1986). *Aire composición y química*. Nueva York: Cambridge University.
- Cacua-Madero, K. P. (2013). *Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética*. Bogotá: Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín.
- Carde, N. (n.d.).
- Cárdenas Rodríguez, N. (2005). *Especies reactivas de oxígeno y sistemas antioxidantes: aspectos básicos*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cerrada Martínez, P. (2017). *Diseño y análisis de una planta de separación de gases*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

- Ciencia y Tecnología. (2021, Noviembre 22). *El descubrimiento del oxígeno*. Retrieved from El descubrimiento del oxígeno: <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2015/08/01/el-descubrimiento-del-oxigeno/>
- Clavería Vila, P. L. (2021). *Modelización y simulación de plantas criogenicas de separación de aire con HYSYS*. Valencia: Universidad de Zaragoza.
- Comisión de Salud. (2021). *Dictamen de la comisión de salud de cinco puntos de acuerdo por lo que se exhorta a diversas instituciones para que se supervise el abasto, adquisición y precios adecuados de oxígeno para el COVID-19*. Ciudad de México: Informe de Gobierno.
- CRYOINFRA. (2022, Febrero 10). *Lixiviación de oro y plata con O2*. Retrieved from Lixiviación de oro y plata con O2: <https://grupoinfra.com/files/libreria-de-descargas/lixivacion-oro-plata.pdf>.
- Cuenca Alcolcel, I. (2019). *Oxicombustión en motores de encendido provocado con producción de oxígeno in-situ mediante membranas de separación*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Ecured. (2021, Septiembre 21). *Henry Cavendish*. Retrieved from Henry Cavendish: https://www.ecured.cu/Henry_Cavendish.
- Educación Química. (2023, Mayo 22). *Los avances de la química. Educación científica (y algo más de historia)*. Retrieved from Los avances de la química. Educación científica (y algo más de historia): <https://educacionquimica.wordpress.com/2012/05/29/recordando-a-uno-de-los-mas-grandes-humphry-davy-1778-1829/>
- Edumedia. (2021, Noviembre 16). *Experimento de Lavoisier*. Retrieved from Experimento de Lavoisier: <https://www.edumedia-sciences.com/es/media/958-experimento-de-lavoisier>
- El economista. (2021, Junio). *La crisis del oxígeno el bien máspreciado ante el COVID-19*. Retrieved from La crisis del oxígeno el bien máspreciado ante el COVID-19: <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/La-crisis-del-oxigeno-el-bien-mas-preciado-ante-Covid-20210111-0001.html>
- El sol de Hidalgo. (2021, Noviembre). *Explota tanque de oxígeno de paciente COVID*. Retrieved from Explota tanque de oxígeno de paciente COVID: <https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/regional/explota-tanque-de-oxigeno-de-paciente-covid-6257726.html>.
- Eliana Alfaro, M. (2013). *Análisis costo-beneficio en la implementación de una planta concentradora de oxígeno a través del proceso de adsorción por cambio de presión (PSA), para uso medicinal del mismo en Instituciones de salud de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*. Buenos Aires: Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales.
- escobedo, m. (1990). *los notivas*. nuevo leon: reverté.
- Facultad de Química. (2021, Junio). *Por disrupción en la cadena de distribución, la escasez de oxígeno medicinal*. Retrieved from Por disrupción en la cadena de distribución, la escasez de oxígeno medicinal: <https://quimica.unam.mx/por-disrupcion-en-la-cadena-de-distribucion-la-escasez-de-oxigeno-medicinal/>.
- Fonturbel, F. (2004). *Origen del agua y el oxígeno molecular en la tierra: efecto sobre la biodiversidad*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- García Fayos, J. (2012). *Separación de oxígeno mediante membranas asimétricas de La0.58Sr0.4Co0.2Fe0.8O3-δ*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- GettyImages. (2023, Junio 11). *Carl Wilhelm Scheele*. Retrieved from Carl Wilhelm Scheele: <https://www.gettyimages.com.mx/detail/fotograf%C3%ADa-de-noticias/carl-wilhelm-scheele-apparatus-for-fotograf%C3%ADa-de-noticias/861246120?language=es>

- Gobierno de México. (2022, Mayo 20). *COVID-19*. Retrieved from COVID-19: <https://coronavirus.gob.mx/covid-19/>.
- Gobierno del Estado de México. (2022, Febrero 22). *¿Cuándo usar oxígeno medicinal?* Retrieved from *¿Cuándo usar oxígeno medicinal?*: <https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/cuando-usar-oxigeno-medicinal>
- Gracia Gúzman, R. (2023, Mayo 20). *Informe Senado de la República*. Retrieved from Informe Senado de la República: [http://www.gepsie.com.mx/ArchivosProyecto/160317gp\(In-Gasolina-Gracia\).pdf](http://www.gepsie.com.mx/ArchivosProyecto/160317gp(In-Gasolina-Gracia).pdf)
- Gutiérrez Ríos, E. (1978). *Química Inorgánica*. Barcelona: Reverté.
- Hardavella, G. (2019). *Oxygen devises and delivery systems*. Breathe.
- Herraiz Cardona, I. (2012). *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua*. València: Universitat Politècnica de València.
- IMSS. (2020). *Material de apoyo*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Seguro Social.
- Infra Médigas. (2002). *Manual de buenas prácticas en instalaciones y en el manejo de gases medicinales*. Ciudad de México: Infra.
- Intendencia Montevideo. (2021, Noviembre 12). *Principales contaminantes del aire*. Retrieved from Principales contaminantes del aire: <https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>
- Kumar, S. (2022). *El oxígeno médico es vital en la pandemia de COVID-19: técnicas de producción desde lo natural hasta lo artificial*. India: IJPAP.
- La jornada San Luis. (2021, Noviembre). *Estalla local de tanques de oxígeno en Iztapalapa fallece una mujer*. Retrieved from Estalla local de tanques de oxígeno en Iztapalapa fallece una mujer: <https://lajornadasanluis.com.mx/nacional/estalla-local-de-tanques-de-oxigeno-en-iztapalapa-fallece-una-mujer/>
- LINDE. (2023, 08 30). *Usos y aplicaciones del gas oxígeno y oxígeno líquido*. Retrieved from Usos y aplicaciones del gas oxígeno y oxígeno líquido: <https://www.linde.mx/gases/oxygen?tab=industrias>.
- Medigas. (2022, Mayo 20). *Oxígeno Medicinal*. Retrieved from Oxígeno Medicinal: <https://www.linde.mx/-/media/corporate/praxair-mexico/documents/safety-data-sheets/medigas-ft-oxigeno-medicinal.pdf>.
- Moreno Ruiz, L. A. (2009). *Síntesis de películas de nanotubos de carbono para producción de hidrógeno por electrólisis y emisión de campo*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Morrón Caballero, J. E. (2011). *Estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de generación de oxígeno medicinal IN SITU en el hospital militar central, Bogotá D.C.* Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Omega Air. (2021, Abril 20). *Aplicaciones del oxígeno*. Retrieved from Aplicaciones del oxígeno: <https://www.omega-air.es/noticias/noticias/aplicaciones-del-oxigeno>.
- Organización Mundial de la Salud. (2015). *Recomendaciones para el uso de oxígeno*. Bogotá: OMS.
- Organización mundial de la Salud. (2016). *Especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno*. Ginebra: Organización mundial de la salud.
- Organización Mundial de la Salud. (2016). *Especificaciones técnicas de los concentradores de oxígeno*. Ginebra: OMS.
- Organización Panamericana de la Salud. (2021). *Manual básico de instalaciones de suministro de oxígeno en EMTs y SAAMs*. Ecuador: OMS.

- Pinterest. (2021, Octubre 20). *Simbolo del oxígeno*. Retrieved from Simbolo del oxígeno: <https://www.pinterest.com.mx/pin/804103708452207970/>
- Planeta de libros México. (2023, Mayo 20). *Robert Boyle*. Retrieved from Robert Boyle: <https://www.planetadelibros.com.mx/autor/robert-boyle/000027637>
- QUIMICAFACIL. (2021, Septiembre 23). *Louis-Paul Cailletet*. Retrieved from Louis-Paul Cailletet: <https://quimicafacil.net/infografias/biografias/louis-paul-cailletet/>
- Rayner-Canham, G. (2000). *Química Inorgánica Descriptiva*. Nueva York: Pearson.
- Reporte Indigo. (2021, Diciembre). *Tragedia en la India: mueren 22 pacientes COVID por accidente con suministro de oxígeno*. Retrieved from Tragedia en la India: mueren 22 pacientes COVID por accidente con suministro de oxígeno: <https://www.reporteindigo.com/latitud/tragedia-en-india-mueren-22-pacientes-covid-por-accidente-con-suministro-de-oxigeno/>.
- Riojas Rodríguez, C. E. (2020). *Ampliación de la producción de la planta de generación de oxígeno del Hospital las Mercedes*. Chiclayo: Universidad César Vallejo.
- Rodríguez Núñez, A. (2003). *Gases medicinales: oxígeno y heliox*. Santiago de Compostela: Hospital Clínico Universitario de Santiago de Compostela.
- RT. (2021, Agosto). *Al menos 82 muertos tras la explosión de un tanque de oxígeno*. Retrieved from Al menos 82 muertos tras la explosión de un tanque de oxígeno: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-56878908>.
- Sabogal, N. (1998). El Protocolo de Montreal, un modelo de concertación para la protección de la capa ozono. *Relaciones Internacionales*, 1.
- Salazar Ávila, D. (2018). *Análisis del comportamiento del Bióxido de Azufre (SO₂) y su relación con la temperatura: Caso zona metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) 2011-2016*. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Salud de Coahuila. (2022, Mayo 22). *Qué es el COVID-19*. Retrieved from Qué es el COVID-19: https://www.saludcoahuila.gob.mx/COVID19/que_es.php.
- Sánchez Dirzo, R. (2012). *La odisea del oxígeno*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- SCIENCEPHOTOLIBRARY. (2023, Junio 21). *Experimento de Lavoisier sobre el aire 1776*. Retrieved from Experimento de Lavoisier sobre el aire 1776: <https://www.sciencephoto.com/media/646816/view/lavoisier-s-experiment-on-air-1776>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, Febrero 17). *SEMARNAT*. Retrieved from SEMARNAT: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/protocolo-de-montreal-relativo-a-las-sustancias-que-agotan-la-capa-de-ozono-protocolo-de-montreal#:~:text=Como%20resultado%20de%20las%20negociaciones,de%20ozono%2C%20conocidas%20como%20SAO>
- Secretaria de Salud. (2014). *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos*. Ciudad de México: Undécima Edición.
- Secretaria de Salud. (2018). *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos*. Ciudad de México: Duodécima Edición.
- Tecnológico de Monterrey. (2022, Febrero 22). *¿Por qué medir el oxígeno es clave en pacientes COVID-19?* Retrieved from ¿Por qué medir el oxígeno es clave en pacientes COVID-19?: <https://conecta.tec.mx/es/noticias/nacional/salud/por-que-medir-el-oxigeno-es-clave-en-pacientes-de-covid19>.
- Toppr. (2023, Junio 25). *Landmark Experiments in the Study of Photosynthesis*. Retrieved from Landmark Experiments in the Study of Photosynthesis: <https://www.toppr.com/ask/content/concept/landmark-experiments-in-the-study-of-photosynthesis-201478/>

- Tudela Gallardo, M. (2019). *Obtención de oxígeno a partir del aire atmosférico para su uso comercial. Estudio de viabilidad técnica y económica*. San Cristobal de la Laguna: Universidad de la Laguna.
- UTEC. (2021, Abril 21). *Oxígeno medicinal e industrial: la gran demanda ante el COVID-19*. Retrieved from Oxígeno medicinal e industrial: la gran demanda ante el COVID-19: <https://www.utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-quimica/oxigeno-medicinal-e-industrial-la-gran-demanda-ante-el-covid-19?fbclid=IwAR3wL5uMLgv4P4q6KMGw6kn-Mk-jnI1OLQfkYv3ZHL1Ec8WGPPhe4ElrpRU>
- Vallejo, M. (2022). *Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México*. Ciudad de México: Gaceta Médica de México.
- Velders, G. (2007). The importance of the Montreal Protocol in Climate. *PNAS*, 6.
- Villavicencio, C. (2009). Estudio de la adsorción de aniones sobre zeolitas sintéticas modificadas con surfactantes. *SCIELO*, 1.