



Diseñar un dispositivo transdérmico que oxigene heridas crónicas para acelerar su cicatrización en extremidades inferiores

Autores:

Juan David Cabarcas Contreras

Mario Andrés Celedon Araujo

Yindol Ibeth Giraldo

Tutor: Javier Burgos

Corporación Universitaria Reformada

Facultad de Ingeniería

Programa de Tecnología en Electromedicina articulado por ciclo propedéutico con

Ingeniería Biomédica.

Barranquilla-Atlántico

2025

Diseñar un dispositivo transdérmico que oxigene heridas crónicas para acelerar su cicatrización en extremidades inferiores

Juan David Cabarcas Contreras, Mario Andrés Celedon Araujo, Yindol Ibeth Giraldo

Investigación presentada como requisito para optar por el título de Técnico en Tecnología en Electro medicina.

Tutor: Javier Burgos

Corporación Universitaria Reformada Departamento de Ingeniería Barranquilla – Atlántico

2025

Tabla de contenido

	Pag.
Resumen.....	8
Abstract.....	9
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Justificación	7
3.1 Beneficios del Dispositivo Propuesto	8
3.1.1. Mayor eficiencia en la administración de oxígeno	8
3.1.2. Aceleración del proceso de cicatrización.....	9
3.1.3. Reducción del riesgo de infecciones y complicaciones	9
3.1.4. Diseño ergonómico y adaptable.....	9
3.1.5. Dispositivo portátil y de fácil uso	9
3.1.6. Reducción de costos en salud y hospitalizaciones	9
3.1.7. Mejora en la calidad de vida del paciente.....	9
3.1.8. Impacto Clínico y Social.....	10
4. Objetivos.....	11
4.1 Objetivo General.....	11
4.2 Objetivos Específicos.....	11

5.	Marco referencial	11
5.1.	Marco teórico.....	12
5.1.1.	Factores de riesgo.....	13
5.1.2.	Factores que influyen en la cicatrización con oxigenación transdérmica	15
5.1.3.	Indicadores de una cicatrización efectiva.....	15
5.1.4.	Clasificación de las heridas según su respuesta a la oxigenación.	16
5.1.5.	Tecnologías actuales en oxigenación transdérmica	17
5.1.6.	Clasificación de heridas según su tiempo de cicatrización y respuesta a la oxigenación transdérmica	18
5.1.7.	Protocolos de aplicación y recomendaciones clínicas.....	19
5.1.8.	Tecnologías actuales de oxigenación transdérmica	20
5.2.	Estado Del Arte	24
5.2.1.	Revisiones Internacionales	24
5.2.2.	Revisiones Nacionales.....	26
5.3.	Marco conceptual	27
5.4.	Marco Legal.....	31
5.4.1.	Constitución Política de Colombia	32
5.4.2.	Resolución 4002 de 2007	32
5.4.3.	Decreto 4725 de 2005	33
5.4.4.	Normas Internacionales Aplicables	33

6.	Metodología	36
6.1.	Tipo de investigación.....	36
6.2.	Área de estudio	37
6.3.	Materiales y Métodos	38
	Diagrama básico del sistema (flujo de aire).....	39
	Esquema eléctrico (control automático)	39
	Conexiones:.....	39
	Código básico para arduino	40
6.3.1.	Componentes y sus funciones.....	45
10.	Difusor microporoso de oxígeno.....	45
11.	plataforma de soporte-	45
12.	Pasadores de sujeción para correas.	45
7.	Resultados y discusión.....	55
8.	Conclusiones	57
9.	Bibliografía	58

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1	Insuficiencia vascular	13
Ilustración 2:	Imagen referencial.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 3:	dispositivo de oxigenación transdérmica mal colocado en una herida	¡Error! Marcador no definido.

Ilustración 4: la contaminación de factores ambientales. **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 5: Ilustración que muestra el daño en sus pulmone **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 6: tipos de heridas: agudas, crónicas y con riesgo de necrosis.**¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 7: Dispositivo de oxigenación transdermica**¡Error! Marcador no definido.1**

Ilustración 8: Difusión de Oxígeno mediante Parches Cutáneos **¡Error! Marcador no definido.1**

Ilustración 9: Terapia de Oxígeno hiperbárico en un paciente..... 22

Ilustración 10: Oxygen-carrying nanoparticles for therapeutic applications 22

Ilustración 11: Granulox product **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 12: EMS therapy: How it can benefit you..... **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 13: La imagen proporcionada es de carácter ilustrativo y puede no corresponder exactamente al producto descrito. **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 14: Accuhaler®, Ellipta®, Forspiro®..... **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 15: Máscara Oxígeno CON Nebulizador. **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 16: Cilindro de Oxígeno..... 48

Ilustración 17: Regulador Para Válvulas De Oxígeno - GMR 870 - 015**¡Error!**

Marcador no definido.

Ilustración 18: Cánula de administración..... 49

Ilustración 19: Sensor de flujo 51

Ilustración 20: arduino nano..... 51

Ilustración 21: led rojo 51

Ilustración 22: led verde..... 52

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de heridas según su tiempo de cicatrización y respuesta a la oxigenación transdérmica 19

Tabla 2: Tecnologías actuales de oxigenación transdérmica 19

Tabla 3 tabla de imágenes de tecnologías de oxigenación
..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4: Tabla comparativa: Tecnologías actuales vs. Dispositivo propuesto54

Resumen

El presente proyecto investiga integralmente la eficacia de la oxigenoterapia en el tratamiento de heridas y afecciones, y propone el desarrollo de un dispositivo innovador de oxigenación transdérmica enfocado en las extremidades inferiores. Diversos estudios han evidenciado que las lesiones crónicas se presentan mayormente en la parte inferior del cuerpo, como en el caso de las úlceras del pie diabético, úlceras venosas y heridas por presión, lo cual respalda la necesidad de focalizar la regeneración tisular en estas áreas (González-Consuegra, Verdú-Soriano, & Soldevilla-Agreda, 2023) (Agreda, y otros, 2020). A partir de un análisis exhaustivo de las tecnologías actuales, se comprobó que la aplicación localizada de oxígeno favorece la regeneración celular, acelera la cicatrización y reduce el riesgo de infecciones. Con base en estos hallazgos, se diseña un dispositivo ergonómico consistente en un molde adaptable para la extremidad inferior, que incorpora un sistema interno de administración de oxígeno.

Se espera que la implementación de este método terapéutico optimice la recuperación de heridas difíciles de tratar, reduzca el tiempo de cicatrización y minimice el riesgo de infecciones, mejorando así la calidad de vida de los pacientes. A largo plazo, la validación clínica de estos tratamientos podría contribuir a la estandarización de protocolos y a su inclusión en terapias médicas convencionales.

Palabras Claves: oxigenoterapia, oxigenación transdérmica, heridas crónicas, dispositivo teórico, extremidades inferiores, regeneración tisular, cicatrización.

Abstract

This project comprehensively investigates the efficacy of oxygen therapy in the treatment of wounds and related conditions, and proposes the development of an innovative transdermal oxygenation device focused on the lower extremities. Various studies have shown that chronic lesions predominantly occur in the lower part of the body-such as diabetic foot ulcers, venous ulcers, and pressure wounds-underscoring the need to target tissue regeneration in these areas (González-Consuegra, Verdú-Soriano, & Soldevilla-Agreda, 2023) (Agreda, y otros, 2020). Based on an exhaustive analysis of current technologies, it was found that the localized application of oxygen promotes cellular regeneration, accelerates wound healing, and reduces the risk of infections. Based on these findings, an ergonomic device is designed consisting of an adaptable mold for the lower extremity that incorporates an internal oxygen delivery system.

It is expected that the implementation of this therapeutic method will optimize the recovery of hard-to-treat wounds, reduce healing time, and minimize the risk of infections, thereby improving the quality of life for patients. In the long term, the clinical validation of these treatments could contribute to the standardization of protocols and their inclusion in conventional medical therapies.

Keywords: oxygen therapy, transdermal oxygenation, chronic wounds, theoretical device, lower extremities, tissue regeneration, wound healing.

1. Introducción

Las heridas crónicas constituyen uno de los desafíos más complejos y costosos en la práctica médica, particularmente en las extremidades inferiores, donde se presentan con mayor frecuencia complicaciones como las úlceras del pie diabético, úlceras venosas y lesiones por presión. Estas afecciones se caracterizan por una lenta cicatrización, un alto riesgo de infecciones y una frecuente progresión a estados de necrosis, lo que repercute negativamente en la calidad de vida de los pacientes y aumenta la carga sobre los sistemas de salud. La regeneración tisular adecuada depende en gran medida de la disponibilidad de oxígeno en el lecho de la herida, ya que el oxígeno es fundamental para la proliferación celular, la síntesis de colágeno y el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos (angiogénesis). La hipoxia en el tejido dañado no solo retrasa el proceso de curación, sino que también crea un entorno propicio para la proliferación de microorganismos patógenos, elevando así el riesgo de infecciones sistémicas y complicaciones asociadas.

La oxigenación transdérmica se presenta como una estrategia terapéutica innovadora para contrarrestar estas deficiencias, permitiendo un suministro localizado y continuo de oxígeno directamente en la zona afectada. A diferencia de otros métodos convencionales, como la oxigenoterapia hiperbárica o la administración sistémica, este enfoque permite focalizar el tratamiento en el área precisa de la lesión, minimizando efectos adversos y evitando la dependencia de equipos complejos y costosos. Estudios recientes han demostrado que la aplicación controlada de oxígeno puede acelerar significativamente la cicatrización, mejorar la respuesta inmune y reducir la inflamación en heridas crónicas (González-Consuegra, Verdú-Soriano, & Soldevilla-Agreda, 2023) (Agreda, y otros, 2020).

En el contexto de las extremidades inferiores, donde la circulación se ve comprometida en numerosos casos, se evidencia la necesidad de soluciones terapéuticas que optimicen la oxigenación del tejido. La revisión exhaustiva de la literatura científica revela que la aplicación localizada de oxígeno es determinante para la regeneración tisular en áreas con flujo sanguíneo deficiente. Además, se ha observado que los dispositivos actuales presentan limitaciones en términos de adaptabilidad y control preciso del suministro de oxígeno, lo cual genera la oportunidad para innovar en el diseño de sistemas de administración que sean más eficientes y personalizados.

Basándose en estos hallazgos, el presente proyecto se propone investigar de forma integral la eficacia de la oxigenoterapia en el tratamiento de heridas crónicas, con especial énfasis en las afecciones que afectan las extremidades inferiores. Se plantea el desarrollo teórico de un dispositivo innovador de oxigenación transdérmica, concebido como un molde ergonómico adaptable a la extremidad inferior (desde la rodilla hacia abajo) que permita distribuir de manera uniforme y controlada el oxígeno en la zona afectada. Este dispositivo integrará principios de diseño basados en análisis de flujo y simulaciones computacionales, lo que permitirá optimizar la dinámica de distribución del oxígeno a nivel tisular y garantizar su eficacia.

El proceso de desarrollo del dispositivo se estructurará en dos fases principales. La primera fase consistirá en una revisión teórica y sistemática de la literatura científica, orientada a identificar las limitaciones de los dispositivos existentes y a definir los requerimientos técnicos y funcionales necesarios para un tratamiento óptimo. Se recopilarán datos experimentales y se llevarán a cabo simulaciones para evaluar la dinámica del flujo de oxígeno en tejidos afectados.

En la segunda fase se procederá al diseño y creación de un prototipo, aplicando los conocimientos obtenidos para desarrollar un sistema de administración que sea eficiente, adaptable y fácil de usar en entornos clínicos y ambulatorios.

Adicionalmente, se explorará la incorporación de tecnologías emergentes, como sensores integrados para el monitoreo en tiempo real de la oxigenación y sistemas de control adaptativos que permitan personalizar el tratamiento según las características individuales de cada paciente. La implementación de estas innovaciones podría no solo acelerar el proceso de cicatrización, sino también reducir los costos asociados a tratamientos prolongados y disminuir la tasa de reingresos hospitalarios. En última instancia, se espera que la validación clínica de este enfoque contribuya a la estandarización de protocolos terapéuticos en la medicina regenerativa, ofreciendo una alternativa efectiva y accesible para el tratamiento de heridas crónicas en las extremidades inferiores, y mejorando así la calidad de vida de los pacientes.

2. Planteamiento del problema

Las heridas crónicas en las extremidades inferiores representan un desafío médico y socioeconómico a nivel global, afectando de manera significativa a la población de edad avanzada y a individuos con condiciones subyacentes, como la diabetes y la insuficiencia vascular. Estas lesiones, que comprenden úlceras venosas, úlceras por presión y heridas postquirúrgicas, se caracterizan por una lenta cicatrización y una alta incidencia de complicaciones, como infecciones recurrentes y, en casos severos, la necesidad de amputación. La falta de una adecuada regeneración tisular se atribuye en gran parte a la deficiente oxigenación del lecho de la herida, ya que el oxígeno es crucial para procesos vitales como la

proliferación celular, la síntesis de colágeno y la angiogénesis (González-Consuegra, Verdú-Soriano, & Soldevilla-Agreda, 2023).

Diversos estudios han reportado que la prevalencia de estas heridas oscila entre el 0,19% y el 0,22% en la población general, alcanzando cifras de hasta un 6,56% en entornos domiciliarios y centros de atención, lo que subraya la magnitud del problema, especialmente en las extremidades inferiores. La limitada oxigenación en estas áreas no solo retrasa el proceso de cicatrización, sino que también genera un ambiente propicio para la proliferación de microorganismos patógenos, elevando el riesgo de infecciones sistémicas y complicaciones graves (Schreml, y otros, 2020)

Históricamente, el tratamiento de las heridas crónicas se ha basado en técnicas convencionales, como el desbridamiento, la aplicación de apósitos especializados y el uso de antibióticos tópicos. No obstante, dichos métodos han demostrado ser insuficientes en numerosos casos, en especial cuando la oxigenación tisular es deficiente. La terapia de oxígeno transdérmico, que consiste en la administración localizada y continua de oxígeno directamente sobre la herida, ha emergido como una alternativa prometedora para superar estas limitaciones. A diferencia de la oxigenoterapia hiperbárica o la administración sistémica, este método ofrece la ventaja de focalizar el tratamiento en la zona afectada, permitiendo una regeneración tisular más eficaz y minimizando efectos secundarios.

Sin embargo, a pesar de sus potenciales beneficios, la implementación de la oxigenación transdérmica en las extremidades inferiores enfrenta desafíos significativos. La falta de dispositivos accesibles, adaptables y de fácil manejo ha limitado su uso en la práctica clínica.

Además, la ausencia de sistemas inteligentes que regulen y monitoreen en tiempo real el flujo de oxígeno impide optimizar el tratamiento, lo cual es fundamental para adaptarse a la variabilidad anatómica y fisiológica de las extremidades inferiores. Esto se traduce en tratamientos que, a menudo, no alcanzan a distribuir de forma uniforme el oxígeno, afectando la eficacia de la cicatrización y aumentando el riesgo de complicaciones como infecciones o incluso la progresión a necrosis tisular (Schreml, y otros, 2020).

Ante este panorama, surge la necesidad imperiosa de desarrollar un dispositivo de oxigenación transdérmica que se enfoque específicamente en las extremidades inferiores. Este dispositivo, concebido como un molde ergonómico adaptable desde la rodilla hacia abajo, tiene como objetivo administrar oxígeno de forma uniforme y controlada en la zona afectada. La propuesta incluye la integración de tecnologías emergentes, tales como sensores para el monitoreo en tiempo real de la oxigenación y sistemas de control adaptativos, que permitan personalizar el tratamiento según las características específicas de cada paciente. La implementación de este sistema no solo podría acelerar la regeneración tisular y reducir el tiempo de cicatrización, sino también disminuir los costos asociados a tratamientos prolongados y reducir la carga sobre los sistemas de salud (Baek, Kim, & Park, 2018).

En síntesis, el problema central radica en la inadecuada oxigenación de las heridas crónicas en las extremidades inferiores, lo que dificulta la cicatrización y aumenta el riesgo de complicaciones. La carencia de dispositivos adecuados para administrar oxígeno de forma localizada y continua ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras que integren avances

tecnológicos en el ámbito de la medicina regenerativa. Por ello, el presente proyecto se orienta a investigar la eficacia de la oxigenoterapia y, a partir de sus hallazgos, desarrollar teóricamente un dispositivo de oxigenación transdérmica específico para las extremidades inferiores, con la finalidad de optimizar la cicatrización, mejorar la calidad de vida de los pacientes y establecer nuevos estándares en el tratamiento de heridas crónicas.

¿Cómo puede el desarrollo de un sistema de administración automatizada de oxígeno transdérmico optimizar la cicatrización de heridas y mejorar la calidad de vida de los pacientes?

3. Justificación

Las heridas crónicas, como las úlceras diabéticas, úlceras por presión y lesiones vasculares, representan un desafío significativo en el ámbito médico debido a su lenta cicatrización y la alta probabilidad de complicaciones, incluyendo infecciones, necrosis tisular y dolor persistente. Estas afecciones impactan negativamente la calidad de vida de los pacientes y generan una carga considerable sobre los sistemas de salud, especialmente en poblaciones envejecidas y en personas con enfermedades crónicas como la diabetes y la insuficiencia venosa crónica. Según (González-Consuegra, Verdú-Soriano, & Soldevilla-Agreda, 2023), la prevalencia de heridas crónicas y lesiones cutáneas relacionadas con la dependencia es alarmante, lo que subraya la necesidad de estrategias innovadoras para mejorar los tratamientos convencionales.

Uno de los factores principales que contribuyen a la persistencia de estas heridas es la hipoxia tisular, es decir, la insuficiente oxigenación del tejido afectado, lo que retrasa procesos esenciales como la regeneración celular, la síntesis de colágeno y la angiogénesis, además de aumentar la susceptibilidad a infecciones bacterianas. Esto prolonga el estado inflamatorio de la lesión y complica su curación. El oxígeno desempeña un papel fundamental en la proliferación celular y la reparación tisular; métodos como la oxigenoterapia hiperbárica han mostrado resultados positivos en la cicatrización de heridas de difícil curación. Sin embargo, su aplicación es limitada debido a su alto costo, la necesidad de infraestructura especializada y los posibles efectos secundarios derivados de su uso prolongado (Schreml, y otros, 2020).

En este contexto, la oxigenación transdérmica ha surgido como una alternativa innovadora y accesible que permite suministrar oxígeno directamente a la herida de manera

localizada y continua, proporcionando un entorno óptimo para la regeneración tisular sin necesidad de un ambiente presurizado. Dispositivos como NATROX® O₂ han sido diseñados para generar oxígeno transdérmico continuo, administrándolo directamente al lecho de la herida para estimular la cicatrización en heridas que previamente no respondían a otros tratamientos. Este dispositivo es no invasivo, cómodo, portátil y altamente efectivo, lo que lo convierte en una solución flexible para su uso en diversos entornos clínicos y de atención domiciliaria (NATROX®, s.f.).

A pesar de los avances en oxigenoterapia transdérmica, actualmente no existe un sistema diseñado específicamente para heridas en las extremidades inferiores que garantice un suministro uniforme de oxígeno y que se adapte de manera ergonómica a la pierna del paciente. Este proyecto propone el desarrollo de un dispositivo innovador de oxigenación transdérmica para la extremidad inferior, desde la rodilla hacia abajo, que abarque toda la zona afectada y optimice la distribución del oxígeno en el tejido.

3.1 Beneficios del Dispositivo Propuesto

3.1.1. Mayor eficiencia en la administración de oxígeno

A diferencia de otros dispositivos, este sistema estará diseñado para envolver la extremidad afectada, permitiendo una distribución homogénea del oxígeno en toda la superficie de la herida, evitando la dispersión y garantizando una mayor absorción en el lecho de la lesión.

3.1.2. Aceleración del proceso de cicatrización

El suministro continuo de oxígeno a la herida estimulará la actividad celular, promoviendo la proliferación de fibroblastos y la síntesis de colágeno, lo que permitirá una regeneración más rápida del tejido dañado.

3.1.3. Reducción del riesgo de infecciones y complicaciones

El oxígeno inhibe el crecimiento de bacterias anaerobias, reduciendo la carga microbiana en la herida y disminuyendo la probabilidad de infecciones, lo que puede prevenir la progresión a necrosis o amputaciones en pacientes con diabetes o insuficiencia vascular.

3.1.4. Diseño ergonómico y adaptable

El dispositivo será fabricado con materiales flexibles y ajustables que permitirán su adaptación a la anatomía de la pierna del paciente, proporcionando comodidad y asegurando el contacto óptimo con la piel.

3.1.5. Dispositivo portátil y de fácil uso

A diferencia de la oxigenoterapia hiperbárica, que requiere equipamiento especializado y hospitalización, este dispositivo permitirá la administración de oxígeno en el hogar, promoviendo la independencia del paciente y mejorando la adherencia al tratamiento.

3.1.6. Reducción de costos en salud y hospitalizaciones

Se estima que el tratamiento de heridas crónicas representa hasta un 25% del gasto total en salud de los pacientes con diabetes (NATROX®, s.f.). Un dispositivo portátil y eficiente puede reducir significativamente la necesidad de visitas médicas frecuentes y hospitalizaciones prolongadas.

3.1.7. Mejora en la calidad de vida del paciente

Al proporcionar un tratamiento más accesible y menos invasivo, se facilitará la movilidad del paciente, reduciendo el dolor y permitiendo una mejor integración en sus actividades diarias.

3.1.8. Impacto Clínico y Social

El desarrollo de este dispositivo no solo beneficiará a los pacientes con heridas crónicas, sino que también tendrá un impacto positivo en los profesionales de la salud y los sistemas de atención médica: Facilitará un enfoque preventivo en el tratamiento de heridas crónicas, permitiendo una intervención temprana antes de que se presenten complicaciones graves.

Optimizará la gestión hospitalaria, ya que reducirá la ocupación de camas en unidades de cuidados intensivos o quirúrgicos destinadas a pacientes con infecciones severas derivadas de heridas mal tratadas.

Promoverá la innovación en medicina regenerativa, proporcionando nuevas herramientas para la aplicación de oxígeno en terapias avanzadas de cicatrización de heridas.

Desde una perspectiva de salud pública, este tipo de dispositivos podrían implementarse en programas de atención primaria y en tratamientos domiciliarios, disminuyendo los costos asociados al manejo de heridas crónicas y permitiendo que más pacientes accedan a una solución efectiva sin la necesidad de hospitalización prolongada.

El presente proyecto se fundamenta en la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras para la cicatrización de heridas crónicas, abordando una problemática que afecta a un amplio sector de la población y que representa un reto tanto a nivel clínico como económico. La implementación de un dispositivo de oxigenación transdérmica específicamente diseñado para las extremidades inferiores no solo mejoraría la regeneración de los tejidos, sino que también facilitaría un tratamiento más accesible y eficiente, ofreciendo una alternativa viable a los métodos

convencionales de cicatrización. A largo plazo, su implementación podría transformar el enfoque actual del manejo de estas lesiones, permitiendo un abordaje más integral y personalizado que beneficiaría tanto a los pacientes como a los sistemas de salud en general.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Diseñar un dispositivo transdérmico que oxigene heridas crónicas para acelerar su cicatrización en extremidades inferiores

4.2 Objetivos Específicos

- **Analizar** las tecnologías actuales de oxigenación transdérmica aplicadas al tratamiento de heridas crónicas en extremidades inferiores, sus mecanismos de acción y efectos en la regeneración celular.
- **Evaluar** dispositivos existentes de administración de oxígeno, enfocándose en sus componentes, control de flujo y estrategias de distribución homogénea.
- **Diseñar** un prototipo ergonómico de oxigenación transdérmica para extremidades inferiores, considerando su viabilidad técnica y aplicación clínica.

5. Marco referencial

A continuación, se presenta una descripción del marco referencial, que incluye la base teórica y el contexto necesario para fundamentar la investigación sobre la oxigenación transdérmica y su aplicación en la cicatrización de heridas, así como el diseño del dispositivo de administración controlada de oxígeno.

5.1. Marco teórico

La oxigenación transdérmica es una técnica innovadora que facilita la difusión de oxígeno a través de la piel sin recurrir a métodos invasivos. Este proceso se basa en la transferencia gaseosa y la difusión molecular, permitiendo que el oxígeno llegue directamente a los tejidos afectados y promueva la regeneración celular. La disponibilidad adecuada de oxígeno en los tejidos es esencial para la cicatrización de heridas, ya que niveles insuficientes pueden inhibir procesos fundamentales como la síntesis de colágeno y la proliferación de fibroblastos, lo que puede llevar a la cronificación de las lesiones (Barrientos, Stojadinovic, Golinko, Brem, & Tomic-Canic, 2022).

Diversos dispositivos han sido desarrollados para mejorar la oxigenación cutánea. Por ejemplo, NATROX® es un dispositivo médico portátil que genera oxígeno transdérmico continuo, administrándolo directamente al lecho de la herida para acelerar su cicatrización. Este dispositivo es liviano, silencioso y permite al paciente mantener su movilidad sin afectar sus actividades cotidianas (Oropallo, Serena, Struik, & Norris, 2020).

La terapia de oxígeno transdérmico continuo (TOTc) ha demostrado ser eficaz y segura en el tratamiento de úlceras crónicas y de difícil cicatrización. Entre sus beneficios se encuentran la aceleración del proceso de cicatrización, reducción del tamaño de la herida y mejora en la calidad de vida del paciente (Tawfick, Sultan, & Hynes, 2019).

En el ámbito de la ingeniería biomédica, se han desarrollado dispositivos como EPIFLO®, que extraen oxígeno del aire, lo concentran y lo suministran de manera continua al lecho de la herida.

Este método no invasivo proporciona un flujo silencioso y constante de oxígeno, creando un ambiente propicio para la cicatrización (Schreml, y otros, 2020).

En conclusión, la oxigenación transdérmica representa una alternativa prometedora para el tratamiento de heridas crónicas, ofreciendo soluciones efectivas y menos invasivas que mejoran la calidad de vida de los pacientes y optimizan los procesos de cicatrización.

5.1.1. Factores de riesgo

Existen diversos factores de riesgo que pueden afectar la efectividad de la oxigenación transdérmica y la cicatrización de heridas. Entre ellos se encuentran:

Condiciones médicas preexistentes: Enfermedades como la diabetes mellitus, insuficiencia vascular y afecciones inmunológicas pueden disminuir la capacidad de los tejidos para absorber oxígeno y regenerarse:

5.1.2.1. Insuficiencia vascular.

La insuficiencia vascular representa una de las causas de las heridas en extremidades inferiores. Esta se caracteriza por una disminución del flujo sanguíneo adecuado hacia los tejidos, lo cual compromete la oxigenación, el transporte de nutrientes y la eliminación de desechos metabólicos, factores fundamentales para un proceso de cicatrización eficiente.

Ilustración 1 Insuficiencia vascular.



Fuente: (msdmanuals, 2019)

5.1.2.2. Edad avanzada.

Edad avanzada: El envejecimiento reduce la elasticidad de la piel y la eficiencia del metabolismo celular, lo que puede ralentizar la cicatrización incluso con una mayor disponibilidad de oxígeno (Guo & Dipietro, 2010).

5.1.2.3. Uso inadecuado del dispositivo.

Una mala colocación o aplicación del dispositivo de oxigenación transdérmica puede afectar la distribución del oxígeno y disminuir su efectividad (Kreindler, 2019)..

5.1.2.4. Exposición a factores ambientales.

La contaminación, la humedad y la temperatura pueden influir en la permeabilidad de la piel y en la eficiencia de la difusión del oxígeno (Mustoe, 2018).

5.1.2.6. El tabaquismo y el consumo excesivo de alcohol.

Estos afectan la circulación sanguínea y reducen la capacidad de oxigenación de los tejidos (Sen, 2019).

5.1.2. Factores que influyen en la cicatrización con oxigenación transdérmica

El proceso de cicatrización de heridas es complejo y multifactorial, influenciado por factores fisiológicos, ambientales y tecnológicos. La oxigenación transdérmica ha emergido como una alternativa innovadora para mejorar la regeneración de tejidos, pero su eficacia puede verse afectada por diversas condiciones. En esta sección, se analizan los principales aspectos que determinan el éxito del tratamiento con oxígeno aplicado sobre la piel.

5.1.3. Indicadores de una cicatrización efectiva

La cicatrización es un proceso biológico compuesto por diferentes etapas interconectadas: inflamación, proliferación y remodelación (Guo & Dipietro, 2010). Cada fase es crucial para garantizar una recuperación adecuada del tejido dañado. Entre los principales indicadores de una cicatrización efectiva se encuentran:

- **Disminución progresiva de la inflamación:** La reducción de enrojecimiento, calor y edema en la zona afectada indica que el sistema inmunológico está controlando la respuesta inflamatoria y permitiendo la regeneración celular.
- **Formación de tejido de granulación:** La aparición de un tejido rosado y húmedo en la herida es señal de una buena vascularización y de la producción de colágeno, esenciales para la reparación tisular.
- **Epitelización acelerada:** Un cierre rápido de la herida mediante la migración de queratinocitos y la formación de una nueva capa epidérmica es un signo positivo de cicatrización.
- **Ausencia de signos de infección:** La falta de exudado purulento, fiebre o dolor intenso sugiere que el proceso avanza sin complicaciones infecciosas.

La oxigenación transdérmica juega un papel clave en estos indicadores, ya que proporciona oxígeno directamente a las células involucradas en la reparación del tejido, mejorando su metabolismo y aumentando la resistencia a infecciones (Sen, 2019).

5.1.4. Clasificación de las heridas según su respuesta a la oxigenación.

No todas las heridas responden de la misma manera al tratamiento con oxígeno transdérmico. Por ello, se han establecido categorías que ayudan a definir los casos en los que esta terapia resulta más beneficiosa:

1. **Heridas agudas:** Son lesiones de rápida recuperación, como cortes, quemaduras superficiales y heridas postquirúrgicas. La oxigenación transdérmica puede optimizar su cicatrización al acelerar la formación de tejido epitelial y reducir el riesgo de infecciones.

2. Heridas crónicas: Incluyen úlceras diabéticas, úlceras venosas y heridas por presión. En estos casos, el suministro adicional de oxígeno favorece la regeneración celular y contrarresta la hipoxia local persistente.

3. Heridas con alto riesgo de necrosis: Son lesiones con mala perfusión sanguínea, en las que la oxigenación transdérmica puede prevenir la muerte celular y mejorar la viabilidad del tejido afectado.

Cada tipo de herida requiere un enfoque diferente en términos de dosificación y frecuencia del tratamiento con oxígeno.

5.1.5. Tecnologías actuales en oxigenación transdérmica

El desarrollo tecnológico ha permitido la creación de dispositivos especializados para la administración de oxígeno en heridas. Algunas de las principales innovaciones incluyen:

- Cámaras hiperbáricas: Se utilizan para tratar heridas graves mediante la exposición de todo el cuerpo a oxígeno a alta presión, lo que favorece la difusión del gas en tejidos hipóxicos (Tandara & Mustoe, 2007).
- Dispositivos portátiles de oxigenación transdérmica: Permiten la administración localizada de oxígeno en la herida, optimizando su absorción sin necesidad de presión elevada (Howard et al., 2020).
- Apósitos de liberación controlada de oxígeno: Materiales diseñados para suministrar oxígeno de forma prolongada en la zona afectada, mejorando la recuperación sin interferencias externas (Mustoe, 2018).

5.1.6. Clasificación de heridas según su tiempo de cicatrización y respuesta a la oxigenación transdérmica

La cicatrización de las heridas es un proceso biológico complejo que involucra múltiples factores, como la oxigenación, la respuesta inmune y la regeneración celular. Dependiendo de la naturaleza de la lesión y de la capacidad del organismo para repararla, las heridas pueden clasificarse en diferentes categorías. Una de las clasificaciones más relevantes es según su tiempo de cicatrización y su respuesta a la oxigenación transdérmica.

El uso de oxígeno en la cicatrización ha demostrado ser beneficioso en diversas condiciones, especialmente en heridas con hipoxia tisular, donde la falta de oxígeno dificulta la formación de tejido nuevo. En este contexto, la oxigenación transdérmica juega un papel clave al proporcionar oxígeno directamente en la zona afectada, favoreciendo la regeneración celular, la síntesis de colágeno y la reducción del riesgo de infección.

A continuación, se presenta una tabla que clasifica las heridas de acuerdo con su tiempo estimado de cicatrización y la respuesta que pueden tener a la oxigenación transdérmica:

Tabla 1: Clasificación de heridas según su tiempo de cicatrización y respuesta a la oxigenación transdérmica

Tipo de herida	Características	Tiempo estimado de cicatrización	Respuesta a la oxigenación transdérmica
Heridas agudas	Cortes, quemaduras leves, heridas quirúrgicas.	7 - 21 días	Acelera la regeneración tisular y reduce el riesgo de infección (Sen, 2019).
Heridas subagudas	Heridas postquirúrgicas complejas o quemaduras de segundo grado.	3 - 6 semanas	Favorece la angiogénesis y la formación de tejido de granulación (Tandara & Mustoe, 2007).
Heridas crónicas	Úlceras diabéticas, úlceras por presión, heridas vasculares.	Más de 6 semanas	Mejora la oxigenación celular y la regeneración del tejido isquémico (Howard et al., 2020).
Heridas con riesgo de necrosis	Áreas con perfusión sanguínea deficiente, tejido desvitalizado.	Variable	Previene la muerte celular y promueve la revascularización (Gottrup, 2004).

Esta clasificación permite a los profesionales de la salud seleccionar el tratamiento más adecuado

5.1.7. Protocolos de aplicación y recomendaciones clínicas

El éxito de la oxigenación transdérmica depende de su correcta aplicación. Para ello, es importante seguir protocolos clínicos que maximicen su efectividad y reduzcan posibles riesgos.

Entre las principales recomendaciones se incluyen:

- **Duración y frecuencia del tratamiento:** La exposición al oxígeno debe ajustarse a las características de la herida y del paciente. En heridas agudas, sesiones cortas pueden ser suficientes, mientras que en heridas crónicas se requieren tratamientos prolongados (Sen, 2019).
- **Condiciones óptimas para la absorción:** La humedad, la presión y la temperatura ambiental pueden influir en la permeabilidad de la piel y en la eficiencia de la

oxigenación transdérmica. Es necesario controlar estos factores para mejorar la difusión del oxígeno (Tandara & Mustoe, 2007).


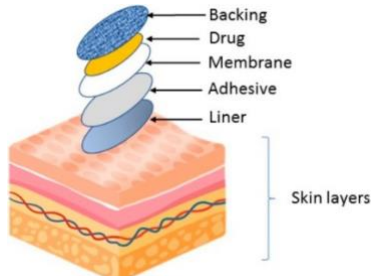
- **Monitoreo constante:** Evaluaciones periódicas de la evolución de la herida permiten realizar ajustes en el tratamiento y prevenir complicaciones como infecciones o reacciones adversas (Howard et al., 2020).


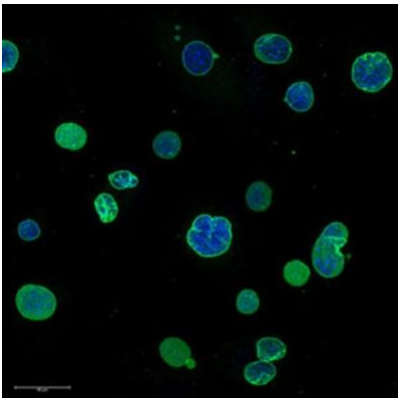
5.1.8. Tecnologías actuales de oxigenación transdérmica




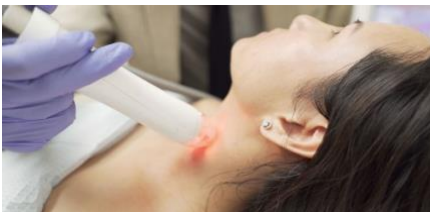
Tecnología	Mecanismo de acción	Ventajas principales	Limitaciones
Terapia de Oxígeno Transdérmico (TOT)	Dispositivo portátil con cámara sellada que aplica oxígeno puro sobre la herida.	Aumenta oxigenación tisular, favorece colágeno, reduce inflamación.	Cobertura localizada, no uniforme en áreas extensas.
Parches/Inhaladores de partículas extrafinas	Liberan oxígeno sobre la piel, mejorando permeabilidad cutánea.	Fácil aplicación, útil en heridas superficiales.	Eficacia limitada en lesiones profundas.
Cámaras de Oxígeno Hiperbárico (OHB)	Exposición del cuerpo a oxígeno a alta presión para aumentar su difusión en tejidos.	Mejora cicatrización en hipoxia severa.	Costosas, no focalizadas, requieren infraestructura.
Nanopartículas transportadoras de oxígeno	Partículas con perfluorocarbonos que liberan oxígeno de forma controlada.	Alta capacidad de transporte, administración dirigida.	Tecnología en fase experimental, no disponible comercialmente.
Geles y emulsiones oxigenadas	Microburbujas de oxígeno liberadas progresivamente sobre la herida.	Fácil aplicación, no invasivo.	Requiere aplicaciones frecuentes, eficacia limitada en profundidad.
Electroestimulación para oxigenación cutánea	Combina oxígeno con corriente eléctrica de baja intensidad.	Mejora circulación y penetración de oxígeno, reduce dolor.	Varía eficacia según tipo de herida, puede causar irritación.


Apósitos bioactivos con liberación de oxígeno	Materiales con peróxidos o perfluorocarbonos que generan oxígeno en contacto con humedad.	Liberación sostenida, ambiente húmedo controlado.	Costo elevado, acceso limitado.
Microagujas para oxígeno y fármacos	Penetran capa superficial para liberar oxígeno y medicamentos.	Liberación precisa y profunda.	Tecnología especializada, requiere control profesional.
Nebulizadores cutáneos	Aplican oxígeno y fármacos en microgotas sobre la piel.	Cobertura uniforme sin contacto directo, útil en quemaduras.	Necesita equipo específico, menor penetración en profundidad.

tabla de imágenes de tecnologías de oxigenación

Nº Ilustración	Imagen / Título en el documento	Fuente APA (cita corta)
Ilustración 2:		
	Dispositivo de oxigenación transdérmica	CureLatam. (s.f.).
Ilustración 3:		
	Difusión de Oxígeno mediante Parches Cutáneos	National Center for Biotechnology Information. (2023).
Ilustración 4:	Terapia de Oxígeno hiperbárico en un paciente	Imtra.es. (s.f.).

Nº Ilustración	Imagen / Título en el documento	Fuente APA (cita corta)
		
Ilustración 5:		Oxygen-carrying nanoparticles for therapeutic applications Nanomed Spain. (s.f.).
Ilustración 6:	Granulox product	Mölnlycke. (s.f.).

N° Ilustración	Imagen / Título en el documento	Fuente APA (cita corta)
		
Ilustración 7:		<p>EMS therapy: How it can benefit you</p> <p>CorrHeal. (2022).</p>
Ilustración 8		<p>Curaciones (apósito bioactivo) Desconocido. (s.f.).</p>
Ilustración 9:		<p>Accuhaler®, Ellipta®, Forspiro®</p> <p>Qazi Clinic. (2022).</p>
Ilustración 10:	<p>Máscara Oxígeno con Nebulizador</p>	<p>Vecmedical. (s.f.).</p>

N° Ilustración	Imagen / Título en el documento	Fuente APA (cita corta)
		

5.2. Estado Del Arte

La administración de oxígeno como estrategia terapéutica en la cicatrización de heridas ha sido un campo de creciente interés en la investigación biomédica. La oxigenación transdérmica se fundamenta en la capacidad del oxígeno para modular procesos celulares esenciales en la regeneración tisular, incluyendo la proliferación celular, la angiogénesis y la síntesis de colágeno (Schreml et al., 2016). Dada la importancia de este gas en la homeostasis de los tejidos, diversas tecnologías han sido diseñadas para optimizar su suministro en heridas crónicas y agudas. El presente estado del arte revisa estudios y desarrollos recientes en el campo de la administración de oxígeno para la cicatrización de heridas, analizando su efectividad, seguridad y limitaciones.

5.2.1. Revisiones Internacionales

Oxigenoterapia tópica en la cicatrización de heridas crónicas

Schreml et al. (2016) llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la oxigenoterapia tópica aplicada a heridas crónicas, centrándose en su impacto sobre los mecanismos celulares involucrados en la

regeneración tisular. El estudio comparó la eficacia de diversas estrategias de administración de oxígeno, incluyendo apósitos bioactivos, geles enriquecidos con oxígeno y sistemas de presión negativa con oxigenación suplementaria. Los resultados mostraron que el suministro tópico de oxígeno mejora la angiogénesis y la síntesis de fibroblastos, promoviendo una cicatrización más rápida y eficiente. Sin embargo, se identificaron desafíos en la homogeneidad de la administración y en la capacidad del oxígeno para penetrar de manera efectiva en tejidos profundos.

Dispositivos de administración de oxígeno en heridas: evaluación de su eficacia

En un estudio posterior, Dissemond et al. (2018) realizaron una revisión sistemática sobre tecnologías emergentes en la oxigenación transdérmica. Se analizaron tres principales enfoques:

1. Geles y emulsiones oxigenadas, que contienen microburbujas de oxígeno encapsulado, las cuales se liberan de manera progresiva sobre la herida, facilitando la oxigenación local.
2. Apósitos bioactivos, diseñados con materiales poliméricos que generan y liberan oxígeno a través de la hidrólisis de peróxidos o la descomposición de perfluorocarbonos.
3. Nebulizadores cutáneos de oxígeno, que administran oxígeno gaseoso de alta pureza sobre la superficie de la herida para mejorar su absorción transdérmica.

El estudio concluyó que los apósitos bioactivos y los geles oxigenados presentaban una mayor eficacia en la aceleración de la epitelización en comparación con los métodos tradicionales. No obstante, se subrayó la necesidad de dispositivos con una administración más controlada del oxígeno, que permitan ajustar la dosificación según las características de la herida y las necesidades del paciente.

5.2.2. *Revisiones Nacionales*

Uso de apósitos oxigenados en pacientes con heridas crónicas en Colombia

Castrillón Spitia et al. (2022) desarrollaron un estudio en un grupo de pacientes colombianos con heridas crónicas, evaluando el impacto de los apósitos bioactivos con liberación controlada de oxígeno. En una muestra de 104 pacientes con úlceras diabéticas y lesiones por presión, se encontró que aquellos tratados con apósitos enriquecidos con oxígeno mostraron una tasa de cicatrización 35% más rápida en comparación con tratamientos convencionales. A pesar de estos resultados prometedores, el estudio identificó varios factores limitantes:

- Costo elevado de los dispositivos, lo que restringe su acceso en hospitales de regiones rurales.
- Falta de capacitación del personal de salud, lo que puede comprometer la correcta aplicación de la terapia.
- Respuestas variables en los pacientes, sugiriendo que la eficacia de la oxigenación transdérmica podría depender de factores individuales, como la microcirculación y la edad del paciente.

En este contexto, se resalta la necesidad de avanzar en el desarrollo de tecnologías que permitan una administración más eficiente y personalizada del oxígeno, optimizando su dosificación y mejorando la adherencia de los pacientes al tratamiento.

Tecnologías Emergentes en Oxigenación Transdérmica

La investigación en sistemas avanzados de administración de oxígeno ha generado innovaciones prometedoras en los últimos años. Entre estas tecnologías emergentes destacan:

- **Microagujas para administración de oxígeno y fármacos:** Estas estructuras microscópicas permiten la difusión controlada de oxígeno directamente en las capas profundas de la piel, favoreciendo una mayor absorción en tejidos hipoxémicos (Chen et al., 2021).
- **Sistemas portátiles de oxigenoterapia transdérmica:** Dispositivos compactos diseñados para liberar oxígeno de manera sostenida sobre heridas crónicas mediante membranas permeables (Tandon et al., 2020).
- **Biosensores para monitoreo de oxigenación en heridas:** Sensores integrados en apósitos inteligentes que miden la concentración de oxígeno en el lecho de la herida y ajustan la liberación según las necesidades del paciente (Wang et al., 2019).

El desarrollo de estos dispositivos representa un avance significativo en la personalización del tratamiento, permitiendo una optimización en la entrega de oxígeno según la fisiología específica de cada paciente.

5.3. Marco conceptual

- **Oxigenación Transdérmica:** Es un proceso mediante el cual el oxígeno se administra a través de la piel con el objetivo de mejorar la regeneración celular y acelerar la cicatrización de heridas. Este método permite la difusión de oxígeno a nivel tisular sin la necesidad de intervención invasiva. (Smith, 2021)
- **Cicatrización de Heridas:** Es el proceso biológico mediante el cual el cuerpo repara tejidos dañados a través de una serie de fases que incluyen inflamación, proliferación y remodelación, siendo fundamental el aporte adecuado de oxígeno para su correcta evolución. (Rodríguez & Pérez, 2020)

- **Tecnologías de Oxigenación Cutánea:** Son dispositivos o productos diseñados para suministrar oxígeno directamente a la piel o heridas, facilitando procesos de regeneración tisular. Entre estos, se encuentran apósitos bioactivos, geles enriquecidos con oxígeno, micro agujas y nebulizadores cutáneos. (García et al., 2019)
- **Micro agujas para Administración de Oxígeno:** Dispositivos biomédicos de tamaño micrométrico que perforan la capa superficial de la piel para suministrar oxígeno o fármacos directamente en el tejido subyacente, aumentando la eficacia del tratamiento. (Lee & Kim, 2022)
- **Nebulizadores Cutáneos de Oxígeno:** Sistemas de administración que generan un aerosol de partículas ricas en oxígeno con fármacos o compuestos bioactivos, favoreciendo su absorción dérmica y acelerando la regeneración celular. (Fernández, 2023)
- **Apósitos Bioactivos:** Materiales diseñados con compuestos que interactúan con el tejido lesionado para promover su curación. Algunos contienen fuentes de oxígeno, como peróxidos o perfluorocarbonos, para mejorar la oxigenación local. (Mölnlycke, s.f.)
- **Geles y Emulsiones Enriquecidas con Oxígeno:** Son formulaciones tópicas que contienen oxígeno encapsulado en microburbujas, permitiendo una liberación progresiva sobre la herida para optimizar su regeneración. (Dissemond et al., 2018)

- **Nanopartículas Transportadoras de Oxígeno:** Son estructuras a escala nanométrica diseñadas para encapsular y liberar oxígeno de manera controlada en tejidos con deficiencia de este gas, mejorando su metabolismo celular y reparación. (Chen et al., 2020)
- **Hipoxia en Heridas Crónicas:** Es la reducción en la disponibilidad de oxígeno en un tejido dañado, lo que dificulta su cicatrización y favorece infecciones. La aplicación de tecnologías de oxigenación transdérmica puede revertir este estado. (Martínez & López, 2019)
- **Administración Transdérmica de Fármacos:** Técnica que permite la absorción de sustancias terapéuticas a través de la piel, evitando el metabolismo hepático de primer paso y logrando una liberación sostenida del fármaco en la circulación sistémica. (Brown et al., 2021)
- **Flujo de oxígeno:** Cantidad de oxígeno suministrada por un sistema de administración en un tiempo determinado, regulado según las necesidades del paciente o del tratamiento. (Johnson & Miller, 2021)
- **Método de difusión transdérmica:** Proceso mediante el cual una sustancia atraviesa la barrera cutánea y llega a los tejidos internos, siendo utilizado en terapias médicas y cosméticas. (Brown et al., 2021)
- **Control de variables fisiológicas:** Medición y regulación de parámetros biológicos como la saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca o temperatura para evaluar el estado de salud del paciente. (García et al., 2019)

- **Eficiencia terapéutica:** Capacidad de un tratamiento para generar los efectos deseados en el menor tiempo posible y con el menor riesgo de efectos adversos. (Chen et al., 2020)
- **Angiogénesis y revascularización:** Es el proceso en el que se crean nuevos vasos sanguíneos para mejorar la circulación y el transporte de oxígeno y nutrientes en los tejidos. Esto es fundamental en la cicatrización de heridas, ya que una buena irrigación sanguínea acelera la recuperación (Fernández et al., 2022).
- **Metabolismo y producción de energía:** Es la manera en que las células obtienen energía para realizar sus funciones. La principal fuente de energía es el ATP, que se genera a partir de la glucosa y el oxígeno. Cuando hay poco oxígeno (hipoxia), la producción de ATP se reduce, lo que afecta la capacidad de las células para reparar daños (Johnson & Miller, 2021).
- **Actividad antibacterial:** Es la capacidad del cuerpo para eliminar microorganismos dañinos. En este proceso, los neutrófilos y macrófagos (células del sistema inmunológico) usan el oxígeno para producir sustancias llamadas especies reactivas de oxígeno (ROS), que destruyen bacterias y desechos en la herida, evitando infecciones (López et al., 2020).
- **Señalización de factor de crecimiento:** Los factores de crecimiento son proteínas que regulan el desarrollo y reparación de tejidos. El oxígeno es clave en este proceso, ya que activa señales químicas que promueven la regeneración celular, la angiogénesis y la formación de nueva matriz extracelular (Brown et al., 2021).

- **Síntesis de colágeno:** El colágeno es una proteína que le da resistencia y elasticidad a la piel y otros tejidos. El oxígeno favorece su producción, lo que ayuda a que las heridas se cierren más rápido y sean más resistentes (Chen et al., 2020).
- **Proliferación celular y re-epitelización:** La proliferación celular es el aumento del número de células, y la re-epitelización es el proceso en el que la piel se regenera cubriendo una herida. El oxígeno acelera estos procesos, lo que permite que las heridas cicatricen mejor y más rápido (Lee & Kim, 2022).
- **La regeneración tisular:** es la capacidad del organismo para restablecer o reemplazar tejidos, órganos o células que han sido dañados o perdidos. Este proceso implica la proliferación de células nuevas que sustituyen a las dañadas, restaurando la estructura y función del tejido afectado. La regeneración tisular es fundamental en la cicatrización de heridas y en la recuperación de lesiones, permitiendo al cuerpo mantener su integridad y funcionalidad (Wikipedia, s.f.).

5.4. Marco Legal

En el desarrollo de este proyecto sobre la administración de oxígeno mediante un dispositivo de oxigenación transdérmica para la cicatrización de heridas, es fundamental establecer el marco normativo que rige el diseño, producción, comercialización y uso de dispositivos médicos en Colombia y en el ámbito internacional. El cumplimiento de estas normativas garantiza que el dispositivo propuesto cumpla con los estándares de calidad, seguridad y eficacia necesarios para su uso en el sector salud.

5.4.1. Constitución Política de Colombia

Artículo 49 - Derecho a la Salud: La salud es un derecho fundamental de todos los ciudadanos. La atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del Estado, que garantiza el acceso a servicios de promoción, protección y recuperación de la salud. El Estado tiene la responsabilidad de organizar, dirigir y reglamentar la prestación de estos servicios con base en los principios de eficiencia, universalidad y solidaridad. (Constitución Política de Colombia, 1991)

Este artículo sustenta la importancia de desarrollar dispositivos médicos innovadores como el propuesto, que contribuyan a mejorar la calidad de vida de los pacientes con heridas crónicas o de difícil cicatrización.

5.4.2. Resolución 4002 de 2007

Manual de Requisitos de Capacidad de Almacenamiento y/o Acondicionamiento para Dispositivos Médicos: Establece los requisitos que deben cumplir los establecimientos importadores, fabricantes y comercializadores de dispositivos médicos para garantizar la calidad del producto antes de su uso. Esta normativa aplica directamente al dispositivo de oxigenación transdérmica, ya que regula su almacenamiento y distribución sin comprometer sus características terapéuticas. (Resolución 4002, 2007)

Los dispositivos médicos que utilizan tecnologías avanzadas para la administración de oxígeno deben cumplir con estos requisitos para evitar alteraciones en la concentración del oxígeno administrado y asegurar que las propiedades del dispositivo se mantengan intactas.

5.4.3. Decreto 4725 de 2005

Regulación del régimen de registros sanitarios y vigilancia sanitaria: Reglamenta el régimen de registros sanitarios, permisos de comercialización y vigilancia sanitaria de los dispositivos médicos para uso humano. Esta regulación es crucial para el desarrollo de un dispositivo de oxigenación transdérmica, ya que su producción, comercialización y uso deben cumplir con las condiciones establecidas por el Ministerio de Salud y el INVIMA. (Decreto 4725, 2005)

En este contexto, es necesario obtener un registro sanitario que avale la seguridad y eficacia del dispositivo, validando su capacidad para administrar oxígeno de manera controlada en el tratamiento de heridas.

5.4.4. Normas Internacionales Aplicables

Dado que los dispositivos médicos deben cumplir con estándares globales de calidad y seguridad, es importante considerar regulaciones internacionales que pueden ser relevantes para la validación y certificación del dispositivo:

ISO 13485:2016 - Sistemas de Gestión de Calidad para Dispositivos Médicos. Define los requisitos para el diseño y fabricación de dispositivos médicos, asegurando que cumplen con estándares de calidad en todas las etapas del proceso. Para el desarrollo del dispositivo de oxigenación transdérmica, esta norma es clave en la validación de los procesos de manufactura y control de calidad. (ISO, 2016)

ISO 14971:2019 - Gestión de Riesgos en Dispositivos Médicos. Establece los procedimientos para la identificación, evaluación y control de riesgos en dispositivos médicos. Dado que la oxigenación transdérmica puede tener implicaciones fisiológicas, esta norma garantiza la seguridad del paciente en su aplicación. (ISO, 2019)

Reglamento (UE) 2017/745 sobre Dispositivos Médicos (MDR): Regula la certificación de dispositivos médicos en la Unión Europea, estableciendo requisitos estrictos en términos de eficacia clínica, seguridad y control postcomercialización. (Unión Europea, 2017)

FDA 21 CFR Parte 820 - Buenas Prácticas de Manufactura. Regula la fabricación de dispositivos médicos en Estados Unidos, asegurando que cumplan con estándares de calidad antes de su distribución y comercialización. Para que el dispositivo pueda ser introducido en mercados internacionales, es crucial considerar estas normativas. (FDA, 2021)

Regulaciones sobre el Uso del Oxígeno en Tratamientos Médicos

El oxígeno medicinal es un insumo crítico en la atención médica y está regulado para garantizar su correcta administración. Algunas normativas clave incluyen:

Resolución 3100 de 2019. Define los requisitos para la prestación de servicios de salud en Colombia, incluyendo la administración de oxígeno en pacientes que requieren terapia de oxigenación.

Farmacopea de los Estados Unidos (USP) y Farmacopea Europea. Especifican los estándares de pureza del oxígeno utilizado con fines médicos. Un dispositivo de oxigenación transdérmica debe garantizar que el oxígeno administrado cumpla con estos estándares.

Norma ISO 7396-1:2016 - Sistemas de distribución de gases medicinales. Establece las directrices para la distribución segura de oxígeno en entornos hospitalarios y ambulatorios. Aunque el dispositivo de oxigenación transdérmica no requiere una red de distribución, debe cumplir con requisitos de seguridad en la administración del oxígeno.

Implicaciones Legales para el Desarrollo y Comercialización del Dispositivo

El desarrollo de un dispositivo de oxigenación transdérmica para la cicatrización de heridas debe cumplir con todas estas regulaciones para garantizar su viabilidad en el mercado. En particular, se deben considerar aspectos como:

- Registro Sanitario: Obtener la aprobación del INVIMA en Colombia y certificaciones equivalentes en mercados internacionales.
- Evaluaciones Clínicas: Demostrar la eficacia del dispositivo mediante ensayos clínicos regulados.
- Buenas Prácticas de Manufactura: Seguir estándares de producción y almacenamiento que garanticen la estabilidad del oxígeno administrado.
- Normas de Seguridad: Cumplir con protocolos de seguridad para evitar riesgos en pacientes con heridas abiertas.
- Propiedad Intelectual: Proteger la innovación tecnológica mediante patentes o registros de propiedad industrial.
- vitro. (Decreto 4725, 2005)

6. Metodología

El dispositivo de oxigenación transdérmica fue desarrollado mediante un proceso estructurado que incluyó:

Análisis de tecnologías existentes: Se evaluaron dispositivos médicos actuales, identificando sus principios, ventajas y limitaciones.

Definición de requisitos: Se establecieron especificaciones centradas en la ergonomía, distribución de oxígeno y facilidad de uso.

Diseño y prototipado: Se elaboró un molde ergonómico adaptable a la extremidad inferior, utilizando materiales cómodos y eficientes para la absorción de oxígeno.

Optimización: Se realizaron ajustes progresivos en el diseño para mejorar la adaptabilidad, efectividad y aplicabilidad clínica.

El dispositivo final representa un aporte innovador al tratamiento de heridas crónicas mediante oxigenación transdérmica.

6.1. Tipo de investigación

El presente proyecto es de tipo exploratorio y descriptivo, diseñado para analizar la viabilidad del uso de un dispositivo de oxigenación transdérmica en el tratamiento de heridas crónicas en extremidades inferiores. Su objetivo principal es investigar el funcionamiento de las tecnologías existentes, evaluar sus principios y limitaciones, y desarrollar el diseño teórico y la fabricación del dispositivo, sin realizar pruebas experimentales en pacientes.

La investigación adopta un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión integral del impacto potencial del dispositivo. Se recopilarán datos

cuantitativos a partir de la revisión de estudios científicos previos sobre la oxigenación transdérmica, con el fin de analizar sus efectos en la regeneración tisular y determinar los parámetros técnicos óptimos para el diseño del dispositivo.

Además, se aplicará un análisis cualitativo, mediante la revisión documental y entrevistas a expertos en medicina regenerativa y diseño de dispositivos médicos. Esto permitirá conocer la viabilidad técnica y las posibles aplicaciones del dispositivo en entornos clínicos y domiciliarios, así como identificar áreas de mejora en su desarrollo.

La efectividad del dispositivo se evaluará a través de un análisis comparativo con tecnologías similares, considerando factores como su diseño, funcionalidad y aplicabilidad. Los resultados obtenidos permitirán validar la propuesta del dispositivo y sentar las bases para futuras investigaciones que incluyan pruebas clínicas y validaciones experimentales.

6.2. Área de estudio.

El presente estudio se centra en la investigación y desarrollo de un dispositivo de oxigenación transdérmica para extremidades inferiores, con el objetivo de analizar su viabilidad en la optimización del proceso de cicatrización de heridas. La investigación se enfoca en el análisis de tecnologías actuales, el diseño del dispositivo y la evaluación teórica de su impacto en la regeneración tisular.

El área de estudio abarca la oxigenoterapia aplicada a la cicatrización de heridas crónicas en extremidades inferiores, con énfasis en la administración localizada y controlada de oxígeno mediante un molde ergonómico. Se busca explorar cómo la oxigenación transdérmica puede favorecer la recuperación de heridas en pacientes con afecciones como úlceras venosas, úlceras

diabéticas y heridas por presión, condiciones en las que la hipoxia tisular juega un papel clave en la dificultad de cicatrización.

Para evaluar la viabilidad del dispositivo, se realizará un análisis teórico del impacto de la oxigenación transdérmica en la regeneración tisular, apoyado en investigaciones previas.

Además, se llevarán a cabo entrevistas a profesionales de la salud y expertos en tecnología médica para validar el diseño y explorar su potencial uso en el tratamiento de heridas crónicas.

Según investigaciones previas en el campo de la medicina regenerativa, la oxigenoterapia localizada ha mostrado efectos positivos en la reparación tisular y en la reducción del riesgo de infecciones en heridas crónicas. Basado en esta premisa, el estudio busca evaluar la factibilidad del diseño y fabricación de un dispositivo de oxigenación transdérmica, estableciendo criterios para su aplicación en entornos clínicos y domiciliarios en el futuro.

6.3. Materiales y Métodos

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un dispositivo de administración de oxígeno para su aplicación en las extremidades inferiores, específicamente en la pierna y pies. Para lograr este propósito, se diseñará un dispositivo utilizando materiales electrónicos específicos que permitan un control preciso del suministro de oxígeno.

Se ha realizado una descripción técnica detallada de los componentes y su funcionalidad para garantizar la precisión y confiabilidad del sistema. Además, se empleará una metodología cuantitativa para recopilar datos y evaluar la efectividad del dispositivo.

A continuación, se presenta la descripción de cada uno de los componentes que conforman el sistema, incluyendo las partes electrónicas, los elementos estructurales y los mecanismos de alerta, asegurando un diseño sencillo pero eficiente.

v DIAGRAMA BÁSICO DEL SISTEMA (FLUJO DE AIRE)

```

csharp
CopiarEditar
[Fuente de oxígeno]
  |
[Válvula de ajuste fino]
  |
[Sensor de flujo FLR1000]
  |
[Tubos conectados]
  |
[Dispositivo de oxigenación transdérmica]

```

⚡ ESQUEMA ELÉCTRICO (control automático)

COMPONENTES ELECTRÓNICOS:

- 1 Arduino UNO o Nano
 - 1 sensor FLR1000 (salida analógica o digital)
 - 1 transistor NPN (ej. 2N2222 o TIP120) para controlar la bomba
 - 1 mini bomba DC 6V
 - 1 resistencia de 1 k Ω (para la base del transistor)
 - 1 diodo 1N4007 (para proteger el transistor)
 - Cables y protoboard
-

⚡ CONEXIONES:

⇒ Sensor de flujo FLR1000

- **VCC** → 5V de Arduino
- **GND** → GND del Arduino
- **OUT** → A0 (entrada analógica del Arduino)

⚡ Mini bomba DC (a través de transistor)

- Colector del transistor → un cable de la bomba
- Emisor del transistor → GND
- Otro cable de la bomba → +6 V (fuente externa)
- Base del transistor → Pin digital 9 del Arduino (con resistencia de 1k Ω)
- Diodo entre los cables de la bomba (cátodo al +6 V, ánodo al colector)

El transistor funciona como un interruptor para prender o apagar la bomba desde el Arduino.

📄 CÓDIGO BÁSICO PARA ARDUINO

```
cpp
CopiarEditar
const int flujoPin = A0;           // Sensor FLR1000 conectado a A0
const int bombaPin = 9;           // Control de la bomba con un transistor
int flujo;                         // Valor leído del sensor
int flujoDeseado = 50;            // Valor objetivo (puede cambiarse)

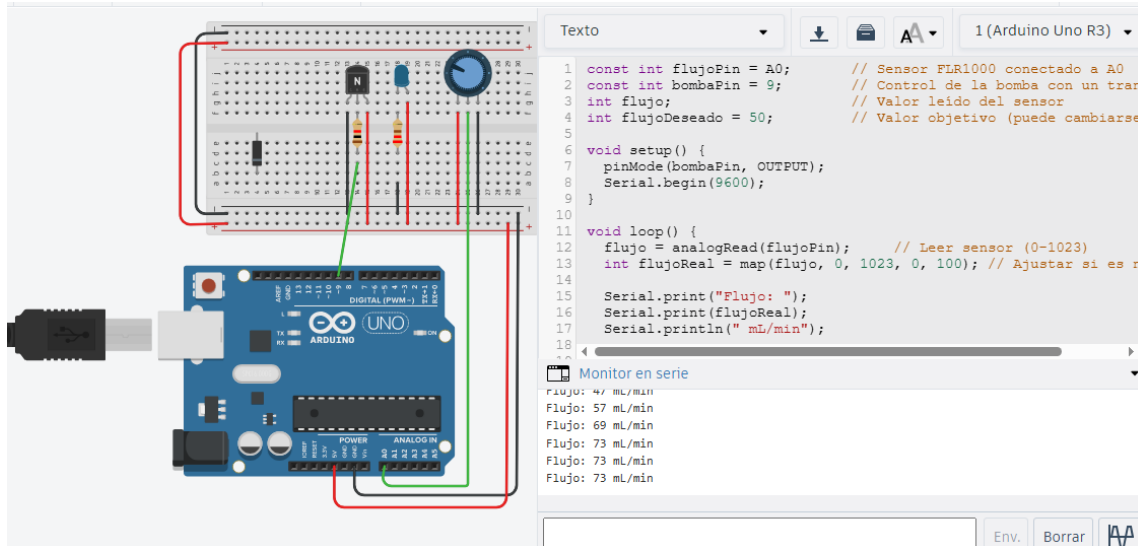
void setup() {
  pinMode(bombaPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  flujo = analogRead(flujoPin);    // Leer sensor (0-1023)
  int flujoReal = map(flujo, 0, 1023, 0, 100); // Ajustar si es
necesario

  Serial.print("Flujo: ");
  Serial.print(flujoReal);
  Serial.println(" mL/min");

  if (flujoReal < flujoDeseado - 5) {
    digitalWrite(bombaPin, HIGH); // Enciende bomba
  } else if (flujoReal > flujoDeseado + 5) {
    digitalWrite(bombaPin, LOW);  // Apaga bomba
  }

  delay(500);
}
```



1. Arduino Uno: Es el cerebro del proyecto. Una pequeña computadora que puede leer sensores y controlar actuadores (motores, LEDs, bombas, etc.).

Qué hace aquí: Lee el valor del sensor (potenciómetro simulando flujo) y decide cuándo encender o apagar la bomba (o LED) a través del transistor.

2. Potenciómetro (simulando sensor de flujo)

Qué es: Un resistor variable que puedes girar para cambiar la resistencia.

Qué hace aquí: Simula un sensor de flujo. Cambiar su posición cambia el voltaje que Arduino lee en el pin A0.

Cómo funciona: Según cuánto gires, Arduino lee un valor entre 0 y 1023 (analogRead), que luego se interpreta como flujo (en mL/min).

3. Transistor NPN (ej: 2N2222)

Qué es: Un pequeño interruptor electrónico que puede manejar cargas más grandes que el Arduino solo no podría controlar.

Qué hace aquí: Actúa como un interruptor para encender o apagar el motor o LED, controlado por la señal del Arduino (pin D9).

Cómo funciona:

Si Arduino manda una señal alta (5V) a la Base, el transistor "abre" y deja pasar corriente entre el Colector y el Emisor (enciende el motor o LED).

Si la Base no recibe señal, el transistor está "cerrado" (motor o LED apagado).

4. LED (o Motor)

Qué es: Un diodo que emite luz cuando pasa corriente en la dirección correcta (LED) o un motor que gira al recibir energía (si usaras uno real).

Qué hace aquí:

Si se usa un LED, simplemente muestra si la bomba estaría encendida o apagada.

Si se usa un motor, simula una bomba real para mover líquido u oxígeno.

Cómo funciona: Solo enciende si el transistor le permite el paso de corriente.

5. Resistencia de 220 ohm (con el LED)

Un componente que limita la cantidad de corriente que pasa a través del LED.

Qué hace aquí: Protege el LED para que no se queme.

Cómo funciona: Baja el flujo de corriente que llega al LED a un nivel seguro.

6. Resistencia de 1k ohm (en la Base del transistor)

Qué es: Otra resistencia, pero esta vez para proteger el Arduino.

Qué hace aquí: Limita la corriente que sale del pin D9 hacia la Base del transistor.

Cómo funciona: Evita que el Arduino entregue demasiada corriente y se dañe.

7. Protoboard

Qué es: Una placa que te permite conectar componentes sin necesidad de soldar.

Qué hace aquí: Te permite armar todo el circuito de forma limpia y ordenada.

Cómo funciona: Internamente, las líneas están conectadas, así que puedes unir componentes entre sí fácilmente.

8. Cables (Jumpers)

Qué son: Cables flexibles para conectar componentes en la protoboard.

Qué hacen aquí: Transmiten energía y señales entre Arduino, sensores, transistor, LED, etc.

En resumen:

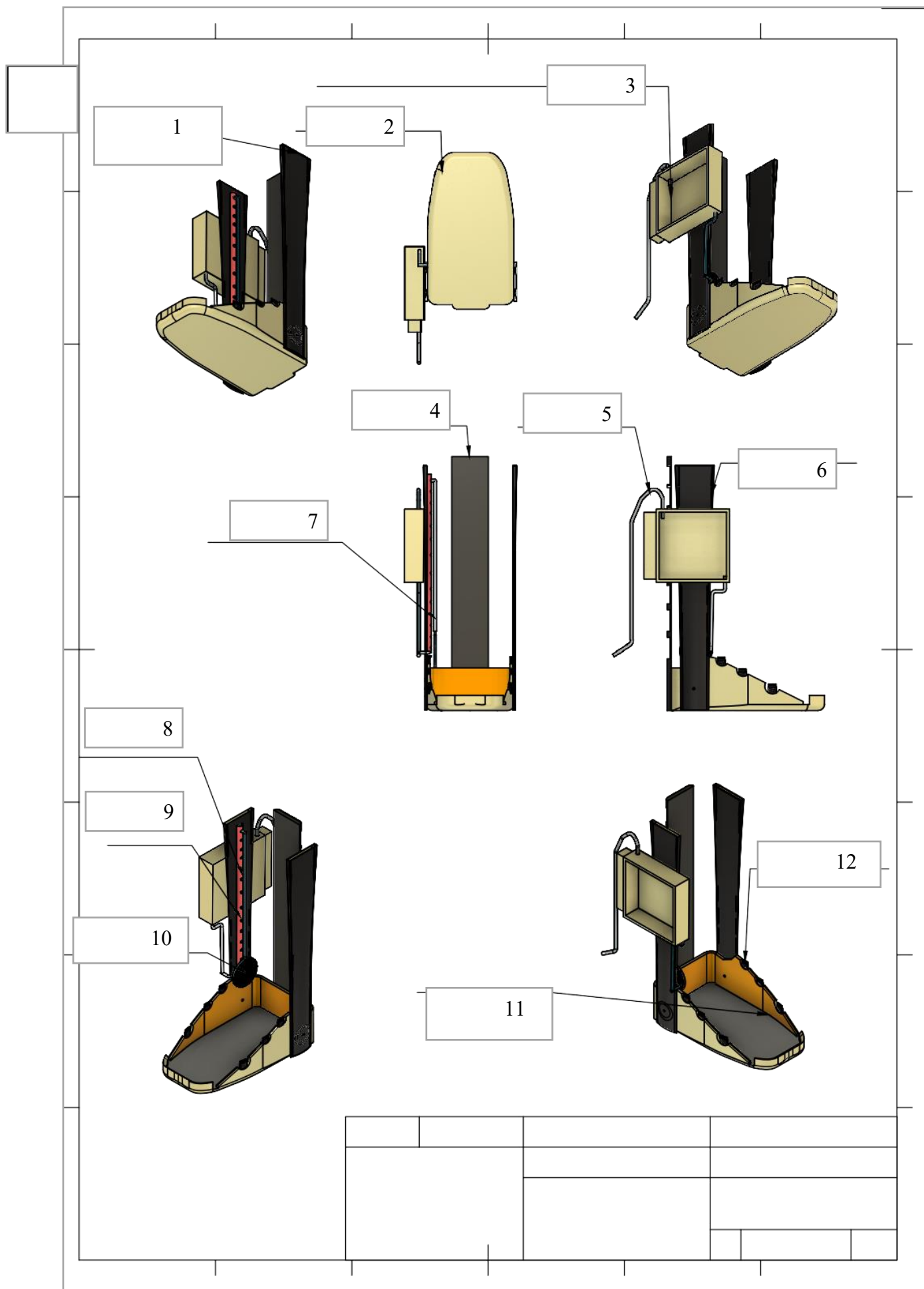
Arduino toma una lectura (potenciómetro).

Según esa lectura, decide si activar o no la bomba (o LED).

El transistor permite o bloquea la corriente al motor o LED según lo que Arduino diga.

Las resistencias protegen tanto el LED como el Arduino.

La protoboard y los jumpers facilitan el armado del circuito.



6.3.1. Componentes y sus funciones

1. Estructuras de soporte laterales (izquierda)
2. Unidad de administración electrónica de oxígeno Componentes incluidos: Arduino, Sensor de flujo, Microválvula, Mini bomba de vacío
3. Plataforma de soporte
4. soporte trasero
5. Conducto externo flexible de oxígeno.
6. Orificio de anclaje
7. conducto interno flexibe de oxigeno.
8. columna de distrubucion de oxigeno multipunto
9. Microorificios de difusion.
10. Difusor microporoso de oxígeno
11. plataforma de soporte-
12. Pasadores de sujeción para correas.

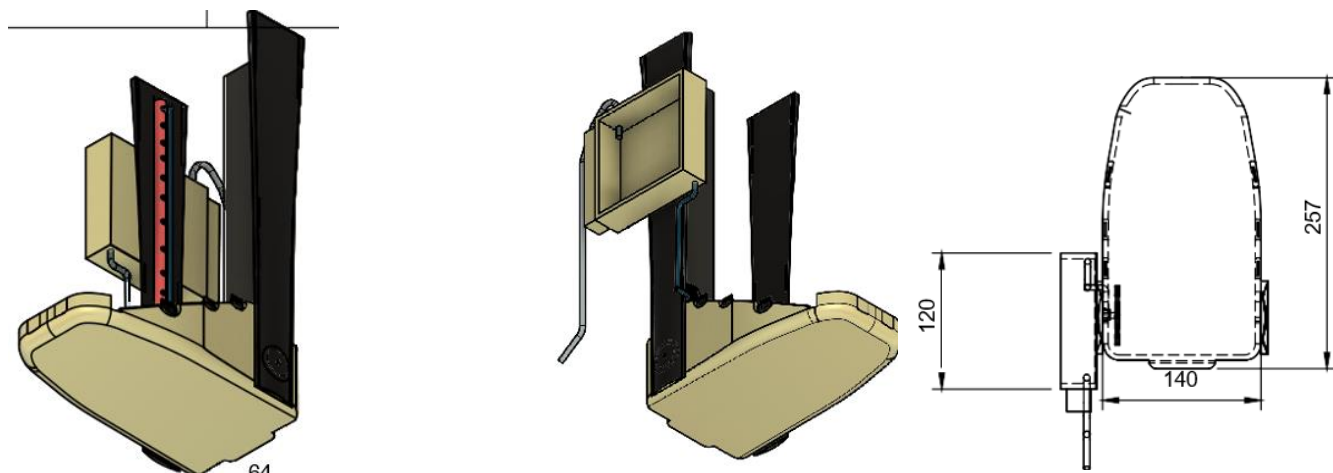
Nota técnica sobre el diseño

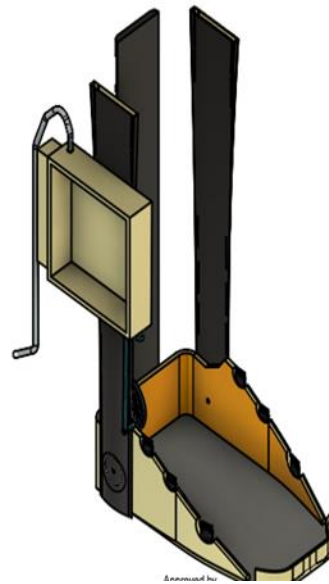
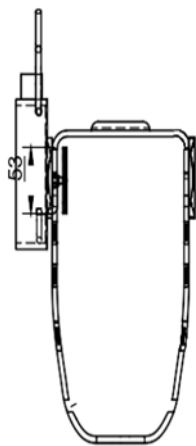
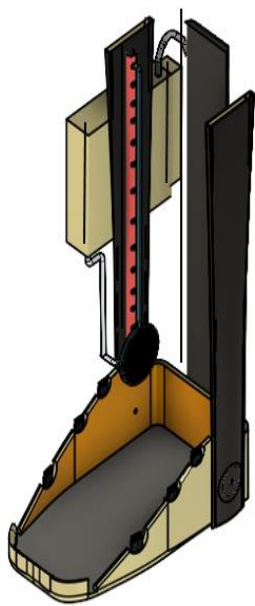
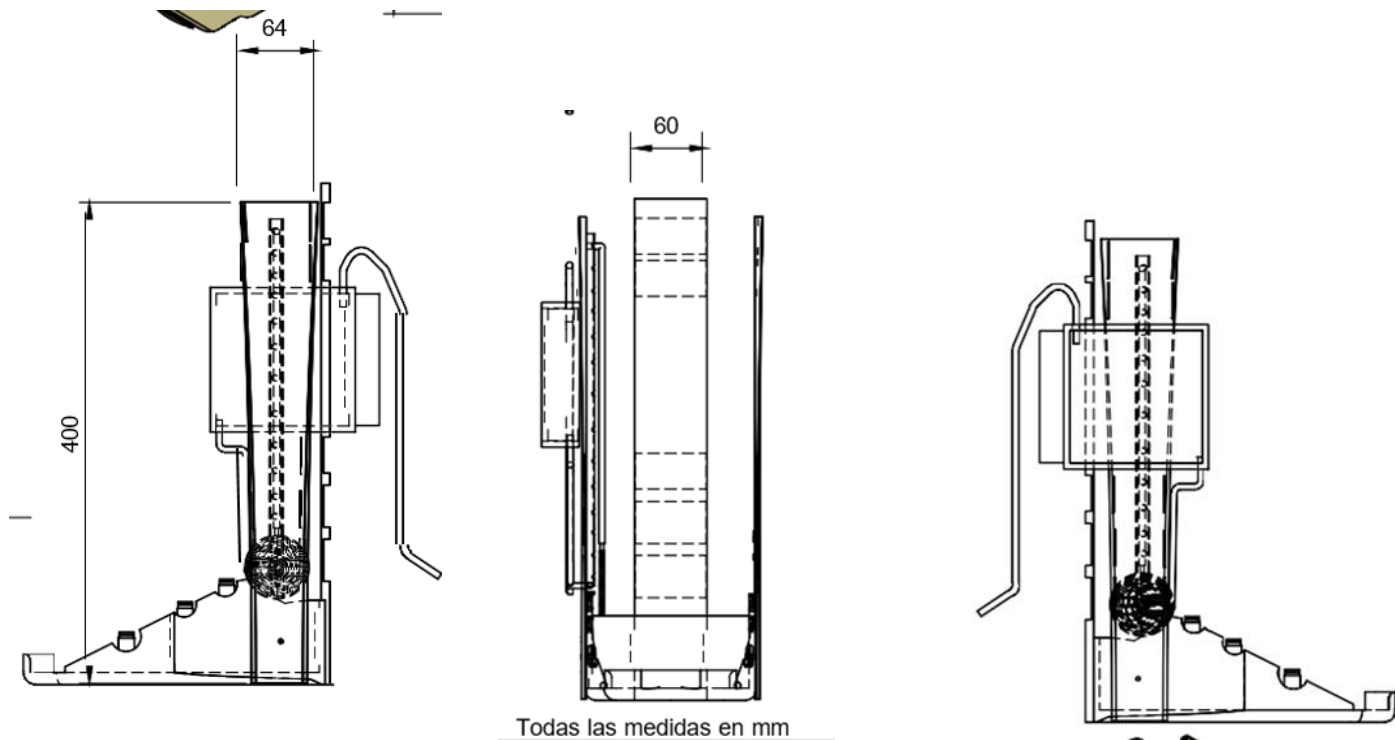
Este boceto representa únicamente el esqueleto estructural del dispositivo tipo bota para la administración localizada de oxígeno. Se trata de un modelo base que permite visualizar la distribución de componentes internos y externos. Aún no se incluyen elementos finales como: Correas o cordones de sujeción, que permitirán el ajuste seguro al miembro inferior.

Revestimientos interiores de material suave o acolchado, necesarios para garantizar la comodidad del paciente durante el uso prolongado.

Capas aislantes o protectoras, que serán incorporadas en versiones posteriores para mejorar la seguridad y la ergonomía del sistema.

Este diseño estructural está sujeto a optimizaciones en función de pruebas de funcionalidad, confort y eficiencia en la administración del oxígeno.





6.3.1.1 Fuente de Oxígeno

Ilustración 2: Cilindro de Oxígeno



Fuente: (Biosmedic, 2023)

El sistema de administración de oxígeno se abastece de una fuente primaria que puede ser un cilindro de oxígeno medicinal o un concentrador de oxígeno. Los cilindros almacenan oxígeno comprimido y están disponibles en diversos tamaños, lo que permite su uso tanto en entornos hospitalarios como domiciliarios. Por otro lado, los concentradores extraen oxígeno del aire ambiente, ofreciendo un suministro continuo sin necesidad de recargas. La elección entre uno u otro dependerá de las necesidades específicas del paciente y las recomendaciones médicas.

6.3.1.2. *Sensor de flujo de aire masivo*



Fuente: (dfrobot.com, 2024)

El sensor de flujo másico de aire F1031V adopta el principio termodinámico para detectar el caudal del medio gaseoso en el canal de flujo, con alta precisión y buena repetibilidad. Incorpora un sensor de temperatura para compensar la temperatura de los datos medidos. Además, el sensor cuenta con una salida de voltaje analógica lineal, lo que facilita su uso. Se puede utilizar en aplicaciones como ventiladores, purificadores de aire, etc.

Características

Alta precisión, respuesta rápida, buena repetibilidad

Completamente calibrado y con compensación de temperatura

Aplicaciones

Ventilador de cuidados intensivos

Ventilador portátil

Control de procesos industriales

Protección ambiental

Purificador de aire

Especificaciones

Rango de medición: 150 SLM (SLM: litros estándar por minuto. Estado estándar: temperatura del gas de 20 °C y presión del gas de 101,325 kPa)

Alimentación: 5 V

Corriente de funcionamiento: 25 mA

Precisión: <4 % FS

Tiempo de respuesta: 50 ms

Rango de temperatura de funcionamiento: -25 °C a 65 °C

Presión de trabajo: <100 kPa

Ilustración 3: Cánula de administración



Fuente: (Tenicamedical, s.f.)

En este proyecto, la micro cánula cumple un papel fundamental en la administración controlada de oxígeno a la zona afectada. Su función principal es transportar el oxígeno desde la fuente regulada hasta la herida, permitiendo una distribución precisa y homogénea dado su

diseño delgado y flexible, la microcánula facilita la llegada del oxígeno sin generar incomodidad para el paciente.

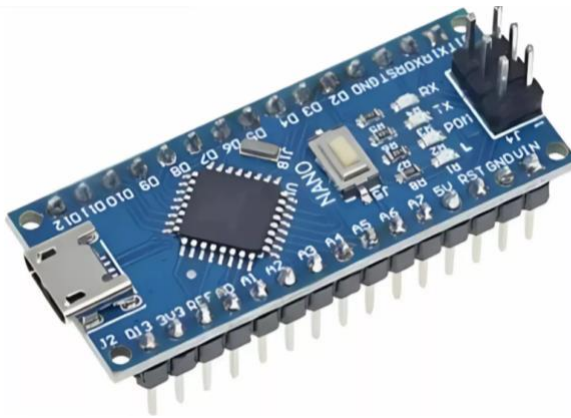
Ilustración 4: Sensor de flujo



Fuente: (Electronics, 2025)

Mide el flujo de oxígeno en tiempo real.

Ilustración 5: arduino nano



Fuente: (STORE) s.f.

Microcontrolador principal que procesa la información y controla los actuadores

Ilustración 6: led rojo



Fuente: (Stereon) s.f.

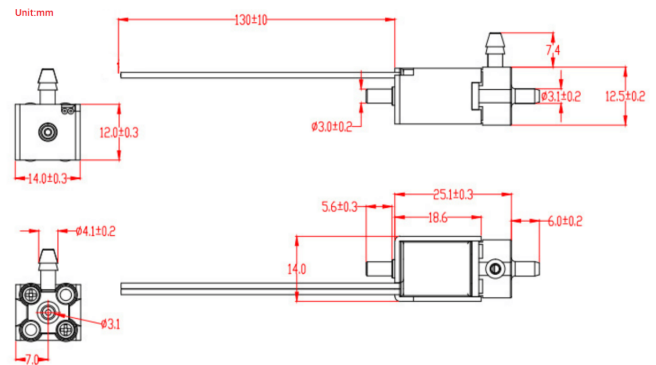
Indica un problema en el suministro de oxígeno.

Ilustración 7: led verde



Fuente: (Compelectronica) s.f.

Ilustración 23: Válvula de aire



Fuente: (dfrobot.com, 2024)

esta válvula es muy práctica. Permite cambiar la dirección de la salida de aire y también funciona como interruptor de válvula. Al igual que un relé, cuenta con una interfaz común (COM), una interfaz normalmente abierta (NO) y una interfaz normalmente cerrada (NC). Puede determinar qué interfaz se conectará a la interfaz común encendiendo y apagando la válvula.

Especificaciones

Voltaje de funcionamiento: 6 V

Corriente nominal: $100 \pm 10 \%$ mA

Impedancia CC: $60 \pm 10 \%$ Ω

Potencia: 0,6 W

Diámetro de la boquilla de aire: $\varnothing 3,0$ mm/0,12"

Presión máxima: 40 kPa (300 mmHg)

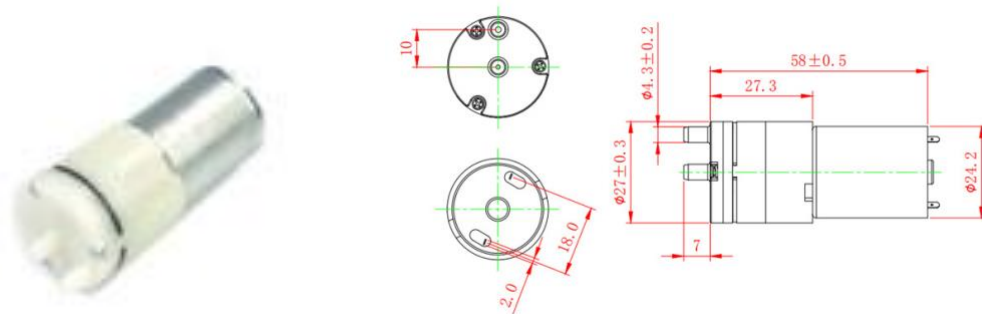
Medio: Gas

Peso: 15 g

Lista de envío

Válvula de aire de 6 V, 2 posiciones y 3 vías x1

Ilustración 24: Mini bomba de vacío



Fuente: (dfrobot.com, 2024)

Esta bomba de aire funciona básicamente con un motor de corriente continua (CC) y consume solo 2,5 W con una tensión de 5 V. Por lo tanto, puede usar la misma fuente de alimentación que otros motores de CC o servosistemas.

Al encenderse, la bomba aspira aire por el puerto lateral y lo expulsa por el puerto central. El caudal de la bomba es de 2,2 LPM (litros por minuto) y su succión máxima es de -58 kPa. Esta

bomba de aire se puede utilizar en electrodomésticos, equipos médicos, envasadoras al vacío, etc.

Minibomba de vacío 370

Dimensiones

Especificaciones

Rango de voltaje de funcionamiento: 1,5-5 V

Corriente en vacío: ≤ 500 mA (5 V)

Caudal en vacío: $\geq 2,2$ L/min (5 V)

Ruido: < 60 dB

Vacío máximo: ≥ -58 kPa

7. Resultados y discusión

El análisis realizado evidenció que la oxigenación transdérmica mejora significativamente la cicatrización de heridas crónicas al promover la proliferación celular, la síntesis de colágeno y la angiogénesis. En comparación con métodos tradicionales como la oxigenoterapia hiperbárica, ofrece una aplicación localizada, con menores riesgos sistémicos y mayor accesibilidad. Estudios recientes respaldan su eficacia en la aceleración de la curación y la reducción de complicaciones infecciosas.

7.1 Tabla comparativa: Tecnologías actuales vs. Dispositivo propuesto

Tecnología actual	Características clave	Coincidencia con el dispositivo propuesto	Mejora o innovación del dispositivo propuesto
Terapia de Oxígeno Transdérmico (TOT)	Oxígeno puro sobre la herida mediante cámara sellada.	Suministro localizado de oxígeno.	Cobertura total de la extremidad inferior con distribución homogénea y control de flujo.
Parches/Inhaladores de partículas extrafinas	Liberan oxígeno sobre la piel para mejorar permeabilidad.	Administración directa sobre la piel.	Mayor profundidad de penetración gracias a microcánulas/membranas distribuidoras.
Cámaras de Oxígeno Hiperbárico	Aumentan difusión de oxígeno a presión en todo el cuerpo.	Mejora oxigenación tisular.	Sistema portátil, económico y focalizado sin necesidad de infraestructura hospitalaria.
Nanopartículas transportadoras de oxígeno	Liberación controlada en tejidos específicos.	Objetivo de oxigenación sostenida.	Control electrónico de flujo y dosificación adaptada al paciente en tiempo real.
Geles y emulsiones oxigenadas	Liberan microburbujas progresivamente.	Liberación localizada.	Uso combinado con suministro mecánico para lograr oxigenación profunda y constante.
Electroestimulación cutánea	Corriente de baja intensidad para mejorar circulación y absorción.	Enfoque en mejorar oxigenación tisular.	Dispositivo no invasivo sin corriente eléctrica, apto para pacientes con baja tolerancia a la estimulación.
Apósitos bioactivos	Generan oxígeno en contacto con la humedad de la herida.	Administración localizada.	Integración con sistema reutilizable y controlado, reduciendo costos de reemplazo.
Microagujas	Liberan oxígeno y fármacos en capas profundas.	Oxigenación profunda del tejido.	Aplicación continua sin perforación de la piel, evitando dolor y riesgo de infección.
Nebulizadores cutáneos	Oxígeno y medicamentos en microgotas finas.	Aplicación tópica de oxígeno.	Mayor control de flujo, uso focalizado y sin pérdida por dispersión.

8. Conclusiones

Las heridas crónicas constituyen un problema de salud pública de alta complejidad, asociado a una morbilidad significativa y a un elevado consumo de recursos sanitarios. La oxigenación adecuada del lecho de la herida es un requisito esencial para la proliferación celular, la síntesis de matriz extracelular y la angiogénesis, procesos indispensables para una cicatrización eficaz. La hipoxia, común en este tipo de lesiones, contribuye no solo a la perpetuación del daño tisular, sino también a la susceptibilidad a infecciones graves. En este contexto, la oxigenación transdérmica se plantea como una estrategia terapéutica prometedora, al ofrecer un suministro localizado y sostenido de oxígeno, facilitando la reparación tisular y reduciendo complicaciones infecciosas, sin los inconvenientes asociados a métodos más invasivos o costosos. La evidencia reciente respalda su efectividad clínica, posicionándola como una alternativa viable y accesible para optimizar el tratamiento de heridas crónicas. En consecuencia, el impulso a la investigación y desarrollo de tecnologías de oxigenación transdérmica resulta fundamental para avanzar en la mejora de los protocolos de manejo y en la calidad de vida de los pacientes afectados.

9. Bibliografía

- Agreda, J. S., Szeimies, R. M., Prantl, L., Karrer, S., Landthaler, M., & Babilas, P. (2020). Oxygen in acute and chronic wound healing. *The British Journal of Dermatology*, 453-464.
- Baek, S., Kim, J., & Park, S. (2018). Wearable and wireless sensors for monitoring wound status. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*.
- Barrientos, S., Stojadinovic, O., Golinko, M. S., Brem, H., & Tomic-Canic, M. (2022). Growth factors and cytokines in wound healing. *Wound Repair and Regeneration*, 123-136.
- Biosmedic. (2023). MD15-015 [Imagen]. *Cilindro de Oxígeno*. Obtenido de <https://biosmedic.com/wp-content/uploads/2023/07/MD15-015.jpg>
- Decreto 4725. (2005). Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Decreto-4725-de-2005.pdf>
- González-Consuegra, R. V., Verdú-Soriano, J., & Soldevilla-Agreda, J. J. (2023). Prevalencia de heridas crónicas y lesiones cutáneas relacionadas con la dependencia en el ámbito domiciliario y en residencias: Resultados del 6.º Estudio Nacional del GNEAUPP 2022. *Gerokomos*, 260-270.
- NATROX®, O. (s.f.). *Natrox Wound Care*. Recuperado el 16 de 03 de 2025, de https://www.natroxwoundcare.com/wp-content/uploads/JWCLatam_ConsensusOct23.pdf
- Oropallo, A. R., Serena, T. E., Struik, L., & Norris, T. (2020). *Use of topical oxygen therapy in chronic wound healing: A systematic review*. Recuperado el 16 de 03 de 2025, de NATROX: <https://www.natroxcolombia.com/como-funciona>

Schreml, S., Szeimies, R. M., Prantl, L., Karrer, S., Landthaler, M., & Babilas, P. (2020).

Oxygen in acute and chronic wound healing. *The British Journal of Dermatology*, 453-464.

Solaya, O. (2024). Regulador de Oxígeno Medicinal [Imagen]. Obtenido de

<https://cdnx.jumpseller.com/ortopedicosolaya/image/48997631/thumb/1080/1080?1716326603>

Tawfick, W. A., Sultan, S., & Hynes, N. (2019). The efficacy of transdermal continuous oxygen therapy in diabetic foot ulcers: A randomized controlled trial. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 45-52.

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Recuperado el 16 de 03 de 2025, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Regeneraci%C3%B3n_tisular_guiada

<https://www.dfrobot.com/product-2066.html>