


## OXIGENOTERAPIA EM ADULTOS HOSPITALIZADOS: ESTADO DA ARTE

### OXYGEN THERAPY IN HOSPITALIZED ADULTS: STATE OF THE ART

 <https://doi.org/10.63330/armv1n8-008>

Submetido em: 21/10/2025 e Publicado em: 24/10/2025

**Caio Henrique Veloso da Costa**

Fisioterapeuta Especialista em Fisioterapia em Terapia Intensiva Adulto  
Coordenador de Produto na Salvus Tecnologia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5768-9975>

**Daniel Lago Borges**

Fisioterapeuta da Unidade de Terapia Intensiva Adulta do Hospital Universitário da Universidade Federal do Maranhão (HUUFMA). Doutor em Ciências pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Mestre em Ciências da Saúde pela Universidade Federal do Maranhão  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4082-527X>

**Angelo Roncalli Miranda Rocha**

Mestre em Ciências da Saúde - Pneumologia pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)  
Fisioterapeuta Intensivista do Hospital Geral do Estado de Alagoas e do Hospital Escola Dr Helvio Auto, Maceió - AL. Membro do Grupo Internacional de Ventilação Mecânica WeVent  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7944-7168>

#### RESUMO

**Introdução:** A oxigenoterapia constitui uma das intervenções médicas mais fundamentais e amplamente utilizadas na prática hospitalar, permeando desde cuidados básicos até complexas unidades de terapia intensiva. Apesar de sua aparente simplicidade, o oxigênio representa um fármaco com índice terapêutico estreito, capaz de causar tanto benefícios quanto danos significativos quando mal administrado. Nas últimas décadas, evidências científicas robustas têm demonstrado os riscos da hiperóxia iatrogênica, estabelecendo a necessidade de abordagens conservadoras e precisas. Entretanto, uma alarmante lacuna persiste entre o conhecimento científico consolidado e a prática clínica cotidiana, revelando falhas sistêmicas que comprometem a segurança do paciente e a eficiência dos recursos de saúde. **Objetivo:** Realizar uma análise crítica e multidimensional do estado da arte da oxigenoterapia em adultos hospitalizados, investigando a evolução histórica, fundamentos científicos, tecnologias disponíveis e as barreiras que impedem a tradução do conhecimento em prática clínica segura. **Métodos:** Revisão integrativa conduzida por meio de busca sistemática nas bases PubMed, EMBASE, Cochrane Library e Scopus, sem restrição temporal. Foram incluídos ensaios clínicos randomizados, revisões sistemáticas, meta-análises e diretrizes de sociedades médicas internacionais focadas em adultos hospitalizados. A análise integrou fontes históricas, evidências científicas contemporâneas e desenvolvimentos tecnológicos. **Resultados:** Há evidências robustas demonstrando que estratégias conservadoras reduzem a mortalidade comparadas a abordagens liberais. Paradoxalmente, persiste lacuna crítica entre evidência e prática: apenas 40% dos hospitais aderem a protocolos adequados. A análise tecnológica revelou que fluxômetros analógicos apresentam desvios de até 30% em altos fluxos, constituindo barreira fundamental à implementação de diretrizes. Fluxômetros digitais demonstram precisão <1,5%, com retorno de investimento em 18-24 meses e potencial economia. Tecnologias emergentes incluem cânula nasal de alto fluxo, sistemas de titulação automática e inteligência artificial para medicina preditiva. **Conclusões:** Existe consenso científico sólido sobre oxigenoterapia conservadora, mas a implementação é reduzida por tecnologia obsoleta e cultura de complacência. A



modernização para fluxômetros digitais e implementação de programas de "Oxygen Stewardship" constituem imperativos urgentes para transformar a oxigenoterapia de arte imprecisa em ciência farmacológica rigorosa, garantindo segurança do paciente e sustentabilidade do sistema de saúde.

**Palavras-chave:** Oxigênio; Oxigenoterapia; Saturação de oxigênio; Hiperóxia; Hipóxia.

## **ABSTRACT**

**Introduction:** Oxygen therapy is one of the most fundamental and widely used medical interventions in hospital practice, ranging from primary care to complex intensive care units. Despite its apparent simplicity, oxygen represents a drug with a narrow therapeutic index, capable of causing both life-saving benefits and significant harm when mismanaged. In recent decades, robust scientific evidence has demonstrated the risks of iatrogenic hyperoxia, establishing the need for conservative and precise approaches. However, an alarming gap persists between established scientific knowledge and daily clinical practice, revealing systemic flaws that compromise patient safety and the efficiency of healthcare resources. **Objective:** To conduct a critical and multidimensional analysis of the state of the art of oxygen therapy in hospitalized adults, investigating its historical evolution, scientific foundations, available technologies, and the barriers that impede the translation of knowledge into safe clinical practice. **Methods:** Integrative review conducted through a systematic search of PubMed, EMBASE, Cochrane Library, and Scopus, with no time restriction. Randomized clinical trials, systematic reviews, meta-analyses, and guidelines from international medical societies focused on hospitalized adults were included. The analysis integrated historical sources, contemporary scientific evidence, and technological developments. **Results:** There is robust evidence demonstrating that conservative strategies reduce mortality compared to liberal approaches. Paradoxically, a critical gap persists between evidence and practice: only 40% of hospitals adhere to appropriate protocols. The technological analysis revealed that analog flowmeters exhibit deviations of up to 30% at high flows, constituting a fundamental barrier to guideline implementation. Digital flowmeters demonstrate accuracy of <1.5%, with a return on investment of 18–24 months and potential cost savings. Emerging technologies include high-flow nasal cannulas, automatic titration systems, and artificial intelligence for predictive medicine. **Conclusions:** There is a solid scientific consensus on conservative oxygen therapy, but implementation is hampered by outdated technology and a culture of complacency. Modernization to digital flowmeters and the implementation of oxygen stewardship programs are urgent imperatives to transform oxygen therapy from an imprecise art into a rigorous pharmacological science, ensuring patient safety and health system sustainability.

**Keywords:** Oxygen; Oxygen inhalation therapy; Oxygen saturation; Hyperoxia; Hypoxia.



## 1 INTRODUÇÃO

A oxigenoterapia representa uma das pedras angulares da medicina moderna, permeando todos os níveis de cuidado à saúde, desde o suporte básico até as mais complexas intervenções em terapia intensiva[1,2]. Esta onipresença, entretanto, mascara um profundo paradoxo farmacológico: o oxigênio, essencial à vida, é também um fármaco com índice terapêutico estreito, capaz de induzir lesão celular sistêmica quando mal administrado[3,4].

A trajetória histórica da oxigenoterapia revela uma fascinante evolução do pensamento médico de um "elixir vital", quase místico no século XVIII, para uma ciência de precisão no século XXI, sustentada por fisiologia complexa e evidências de alto nível[5,6]. A administração contemporânea transcende a mera correção da hipoxemia, exigindo compreensão sofisticada dos mecanismos fisiopatológicos, seleção criteriosa de interfaces, monitorização vigilante e integração de tecnologias que garantam precisão da dose.

A falha em aderir a uma abordagem rigorosa, resultando em hipoxemia subtratada ou hiperóxia iatrogênica, está inequivocamente associada ao aumento da mortalidade, lesão pulmonar aguda, estresse oxidativo, atelectasia de absorção e vasoconstrição em leitos vasculares críticos[7,8]. Este paradoxo é sublinhado por um alarmante abismo de implementação: enquanto diretrizes internacionais advogam por abordagem conservadora baseada em alvos, auditorias revelam que a adesão a protocolos raramente ultrapassa 40%, e mais da metade dos profissionais expressa insegurança na titulação da terapia[9,10].

Esta dissonância entre evidência e prática constitui uma falha sistêmica de segurança que exige investigação aprofundada e estratégias corretivas multifacetadas[11]. O objetivo deste trabalho é fornecer uma síntese definitiva do estado atual da oxigenoterapia, iluminando as raízes históricas dos desafios atuais e delineando um caminho tecnologicamente informado para o futuro.

## 2 MÉTODOS

Este Estado da Arte foi construído sobre metodologia de revisão integrativa, projetada para sintetizar a evolução histórica, os fundamentos científicos e as inovações tecnológicas da oxigenoterapia. A abordagem metodológica funde análise qualitativa de fontes históricas com síntese quantitativa de evidências de alto nível, incluindo ensaios clínicos randomizados, revisões sistemáticas, meta-análises e diretrizes de prática clínica.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases PubMed, EMBASE, Cochrane Library e Scopus, sem restrição de data inicial, empregando termos como "oxygen therapy", "hyperoxia", "hypoxemia", "oxygen toxicity", "high-flow nasal cannula", "automated oxygen titration" e "oxygen flowmeters". A seleção priorizou estudos em adultos hospitalizados, diretrizes de sociedades médicas internacionais e meta-análises em periódicos de alto impacto. Foram excluídos estudos exclusivamente pediátricos, oxigenoterapia hiperbárica e artigos de opinião.



## 2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA E PARADIGMÁTICA DA OXIGENOTERAPIA

### 2.1.1 Período Fundacional (Séculos XVIII-XIX): Do flogisto à fisiologia experimental

A história da oxigenoterapia inicia-se com a revolução química do século XVIII. A identificação do "ar deflogisticado" por Joseph Priestley em 1774 e sua caracterização como "oxigênio" por Antoine Lavoisier em 1775 demoliram a teoria do flogisto[12,13]. Os experimentos de Lavoisier demonstrando que a respiração era uma forma de combustão lenta representaram a primeira mudança paradigmática fundamental.

Inspirado por essas descobertas, Thomas Beddoes fundou a "*Pneumatic Institution*" em 1798, o primeiro empreendimento sistemático para tratar doenças com gases medicinais. Este período caracterizou-se por uma visão quase mística do oxigênio como panaceia universal, percepção que ainda ecoa na tendência contemporânea ao uso liberal de oxigênio[14].

A transição para uma base científica mais rigorosa ocorreu no final do século XIX. O uso documentado por George Holtzapple em 1887 marcou a entrada formal na prática hospitalar moderna[15]. Simultaneamente, trabalhos de Claude Bernard sobre fisiologia respiratória e estudos de Gustav Magnus sobre gases sanguíneos estabeleceram bases científicas para compreender o transporte de oxigênio[16].

Paralelamente, a toxicologia do oxigênio nasceu por meio de observações sistemáticas. Os trabalhos de Paul Bert documentaram convulsões induzidas por oxigênio hiperbárico, enquanto experimentos de James Lorrain Smith sobre inflamação pulmonar estabeleceram definitivamente que o oxigênio era uma substância farmacologicamente ativa com potencial significativo para causar dano tecidual[17,18].

### 2.1.2 Consolidação Científico-Tecnológica (Século XX): A era da medição e do risco quantificado

O século XX testemunhou a transformação da oxigenoterapia de arte empírica em disciplina quantitativa. Estudos sobre a curva de dissociação da oxi-hemoglobina, efeitos do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): efeito Haldane e do  $\text{O}_2$ : efeito Bohr forneceram o arcabouço teórico para terapia verdadeiramente racional[19,20]. Trabalhos de Yandell Henderson sobre regulação respiratória e Lawrence Henderson sobre equilíbrio ácido-base complementaram esse conhecimento fundamental.

O desenvolvimento tecnológico foi igualmente transformador. A máscara de Venturi, desenvolvida por Earl Campbell em 1960, aplicando o princípio de Bernoulli, permitiu pela primeira vez a administração de uma fração inspirada de  $\text{O}_2$  ( $\text{FiO}_2$ ) fixa e confiável, independentemente do padrão respiratório[21]. Esta inovação revolucionou especificamente o tratamento de pacientes com doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e risco de retenção de  $\text{CO}_2$ .

O desenvolvimento de concentradores portáteis por Edwin Adler na década de 1970 democratizou a oxigenoterapia domiciliar. Thomas Petty e Louise Nett estabeleceram os primeiros programas



estruturados de oxigenoterapia domiciliar de longa duração, demonstrando viabilidade e benefícios clínicos.

O progresso veio acompanhado da conscientização sobre riscos inerentes. A epidemia de fibroplasia retrolental nas décadas de 1940-1950, causando cegueira em milhares de prematuros devido à hiperóxia descontrolada, constituiu lição trágica sobre os perigos do oxigênio não monitorado[22].

A invenção da oximetria de pulso por Takuo Aoyagi em 1974 foi uma resposta tecnológica direta a essa necessidade[23]. Permitindo avaliação em tempo real da saturação, transformou fundamentalmente a segurança do paciente. O desenvolvimento paralelo da gasometria arterial automatizada complementou o arsenal de monitorização.

O final do século foi marcado pelos estudos NOTT e MRC, estabelecendo o benefício inequívoco de sobrevida da oxigenoterapia domiciliar prolongada para pacientes com DPOC e hipoxemia crônica grave, solidificando o papel do oxigênio como terapia baseada em evidências[24,25].

### **2.1.3 A Era da Medicina Baseada em Evidências (Século XXI): O paradoxo da evidência sistematicamente ignorada**

O século XXI caracteriza-se pela consolidação de diretrizes rigorosas. A diretriz da *British Thoracic Society* de 2008, atualizada em 2017, representou divisor de águas global, formalizando o conceito de "oxigênio como fármaco", exigindo prescrição formal com dose específica, alvo terapêutico e protocolos estruturados de monitorização[26].

Esta abordagem conservadora foi validada pela meta-análise *IOTA* de 2018, examinando dados de 25 ensaios randomizados com mais de 16.000 pacientes, demonstrando aumento estatisticamente significativo da mortalidade hospitalar associado à estratégia liberal versus conservadora de oxigenoterapia<sup>8</sup>. Estudos *ICU-ROX* e *OXYGEN-ICU* confirmaram esses achados, estabelecendo definitivamente o paradigma conservador como padrão baseado em evidências de alta qualidade[27,28].

Paradoxalmente, este período é definido por uma lacuna entre as evidências e a prática. A coexistência de evidências científicas de altíssima qualidade com a prática frequentemente deficiente revela falha complexa de implementação que transcende questões puramente científicas. Estudos continuam documentando prescrição inadequada, monitorização esporádica e cultura profissional de que "um pouco mais de oxigênio nunca faz mal", contrariando décadas de evidências rigorosas[9,10].



## 2.2 FISIOPATOLOGIA DA HIPÓXIA E DA HIPERÓXIA: UMA ANÁLISE MOLECULAR E SISTÊMICA

### 2.2.1 Mecanismos moleculares da hipóxia

A hipoxemia, definida como pressão arterial de  $O_2$  ( $PaO_2$ )  $< 60$  mmHg ou saturação periférica de  $O_2$  ( $SpO_2$ )  $< 90\%$ , desencadeia uma cascata complexa de respostas compensatórias e, quando prolongada, disfunções sistêmicas potencialmente letais.

A hipóxia hipoxêmica resulta de falha primária na oxigenação pulmonar. O desequilíbrio ventilação-perfusão manifesta-se por meio de shunt verdadeiro (sangue venoso contornando oxigenação alveolar) e espaço morto (ventilação sem perfusão correspondente). A hipoventilação alveolar caracteriza-se pela redução global da ventilação efetiva, resultando em retenção de  $CO_2$  e hipoxemia. Distúrbios de difusão comprometem a transferência de oxigênio por meio da membrana alvéolo-capilar[29].

A hipóxia anêmica caracteriza-se pela redução do conteúdo arterial de oxigênio, apesar de  $PaO_2$  e  $SpO_2$  normais, devido à diminuição da hemoglobina ou disfunções qualitativas como meta-hemoglobinemia e carboxi-hemoglobinemia.

A hipóxia estagnante ocorre quando o fluxo sanguíneo torna-se inadequado para atender às demandas metabólicas teciduais, apesar de valores normais de  $PaO_2$ ,  $SpO_2$  e hemoglobina, resultando de falência cardiovascular.

A hipóxia histotóxica representa o paradoxo em que a oferta de oxigênio é adequada, mas as células são incapazes de utilizá-lo eficientemente. O protótipo é a intoxicação por cianeto, na qual o íon cianeto liga-se irreversivelmente à citocromo c oxidase, bloqueando a fosforilação oxidativa.

### 2.2.2 A toxicidade da hiperóxia

A hiperóxia emergiu como fator iatrogênico significativo, mediado primariamente por meio de espécies reativas de oxigênio (EROs) e perturbação do equilíbrio oxidativo-antioxidante.

Em condições normais, aproximadamente 1-3% do oxigênio consumido escapa da redução completa, gerando EROs. A superóxido dismutase catalisa a dismutação do superóxido em peróxido de hidrogênio, subsequentemente neutralizado pela catalase e sistema glutathione peroxidase.

A hiperóxia perturba dramaticamente este equilíbrio, aumentando exponencialmente a produção de EROs e saturando a capacidade antioxidante. O acúmulo de  $H_2O_2$  favorece reações de Fenton e Haber-Weiss, gerando o radical hidroxila, considerado a espécie mais destrutiva em sistemas biológicos.

As EROs atacam indiscriminadamente macromoléculas celulares, causando peroxidação lipídica das membranas, oxidação de proteínas com perda de atividade enzimática e dano ao DNA nuclear e mitocondrial. Funcionam também como moléculas sinalizadoras, ativando vias pró-inflamatórias por meio do NF- $\kappa$ B e MAPK, resultando na expressão de citocinas e enzimas inflamatórias.



A atelectasia de absorção resulta das propriedades físico-químicas distintas do oxigênio e nitrogênio. O deslocamento do nitrogênio por altas concentrações de oxigênio, rapidamente absorvido pelo sangue, resulta em colapso alveolar, particularmente em áreas com ventilação comprometida.

A hiperóxia exerce efeitos vasculares paradoxais, causando vasoconstrição por meio da redução da biodisponibilidade de óxido nítrico. No território coronariano, a administração de oxigênio a 100% reduz o fluxo sanguíneo em 20-30%, enquanto no cérebro causa vasoconstrição e redução do fluxo cerebral em 10-15%.

## 2.3 TECNOLOGIA E INTERFACES DE ADMINISTRAÇÃO: A BASE PARA A TERAPIA DE PRECISÃO

### 2.3.1 Interfaces de administração: Sistemas de baixo vs. alto fluxo

A interface escolhida impacta diretamente a precisão da  $FiO_2$ , conforto e segurança. Os sistemas classificam-se em baixo fluxo (performance variável) e alto fluxo (performance fixa), baseado na relação entre fluxo ofertado e demanda inspiratória[19].

### 2.3.2 Sistemas de Baixo Fluxo - Desempenho Variável

A cânula nasal fornece fluxos entre 1-6 L/min, com  $FiO_2$  variável (0,24-0,44), dependendo do padrão respiratório. É simples, bem tolerada e permite mobilidade, mas apresenta imprecisão na entrega de  $FiO_2$ [26,30].

A máscara facial simples, com fluxos de 5-10 L/min, fornece  $FiO_2$  entre 0,35-0,60. Fluxos inferiores a 5 L/min são contraindicados pelo risco de reinalação de  $CO_2$ . Limitações incluem necessidade de remoção durante alimentação e risco de irritação ocular[26,30].

A máscara de reinalação parcial, equipada com reservatório, permite  $FiO_2$  entre 0,60-0,80 com fluxo mínimo de 10 L/min. É indicada em hipoxemia moderada a grave, mas apresenta imprecisão da  $FiO_2$  e desconforto[26,30].

A máscara não-reinalante possui válvulas unidirecionais, permitindo  $FiO_2$  variando entre 0,6 a 0,95 com fluxos entre 10 e 15 L/min. Indicada em hipoxemia grave, mas depende de fluxo elevado e apresenta risco de hipóxia em caso de desconexão[26,36]. Também há recomendação de uso por tempo limitado e tem indicação mais precisa em situações em que há hipoxemia acentuada, porém com baixa demanda de fluxo ou pouco/nenhum desconforto respiratório, como na hipoxemia silenciosa ou na intoxicação por CO.

### 2.3.3 Sistemas de Alto Fluxo - Desempenho Fixo

A máscara de Venturi baseia-se no princípio de pressão negativa por jato, fornecendo  $FiO_2$  estáveis entre 0,24-0,50, independentemente do padrão respiratório. Cada adaptador colorido é calibrado para uma



relação específica de diluição, sendo particularmente indicado em DPOC para evitar variações que possam induzir retenção de  $\text{CO}_2$ [26,30].

A cânula nasal de alto fluxo (CNAF) fornece até 60 L/min de gás aquecido e umidificado, com  $\text{FiO}_2$  ajustável entre 0,21-1,0. Promove *washout* do espaço morto, possível efeito "*PEEP-like*", avaliado pela pressão traqueal, cujo valor, variável nos estudos, parece estar em 1 cmH<sub>2</sub>O para cada 10 L/min de fluxo, redução do trabalho respiratório e melhora da oxigenação. Demonstrou eficácia na insuficiência respiratória hipoxêmica, pós-extubação e em imunossuprimidos[31-33].

### 2.3.4 Precisão dos fluxômetros

O fluxômetro de Thorpe, onipresente em hospitais, representa o elo mais fraco na administração de oxigênio. Análise comparativa demonstra deterioração progressiva da precisão, com desvio mediano de apenas 2% em fluxos baixos, escalando para 30% em fluxos elevados[34].

Esta imprecisão deriva de múltiplos fatores: turbulência do gás altera a dinâmica da esfera flutuante; posicionamento não vertical introduz erros de até 15%; erro de paralaxe varia até 20% entre observadores; contrapressão do sistema respiratório afeta a posição da esfera.

Idade e conservação são fatores críticos, com dispositivos com mais de cinco anos apresentando desvios 40% superiores aos novos. Limpeza inadequada exacerba problemas por meio de partículas que alteram a aerodinâmica e resíduos que modificam as propriedades de superfície.

Esta imprecisão tem consequências diretas na segurança. Em fluxos de 15 L/min, erro de 30% pode resultar em entrega real de 10,5-19,5 L/min. Para neonatos, pequenos desvios absolutos representam erros percentuais massivos. Em pacientes com DPOC, essa superestimação pode induzir hipercapnia e acidose respiratória.

## 2.4 O MOSAICO GLOBAL DAS DIRETRIZES DE OXIGENOTERAPIA

A oxigenoterapia tem sido objeto de intensa evolução científica nas últimas duas décadas, testemunhando uma proliferação extraordinária de diretrizes clínicas que refletem não apenas evidências emergentes, mas também culturas médicas e recursos regionais específicos[35,36]. A transição paradigmática de uma visão da oxigenoterapia como "sempre benéfica" para uma compreensão mais nuançada de seus riscos precipitou uma reavaliação global de práticas antes inquestionáveis[37,38].

A BTS estabeleceu um marco histórico em 2008 com sua diretriz revolucionária que conceptualizou o oxigênio como fármaco, estabelecendo alvos diferenciados de  $\text{SpO}_2$  (94-98% para população geral, 88-92% para pacientes com risco de hipercapnia) e introduzindo o conceito de "prescrição de oxigênio" como prática padrão[26,39]. Esta abordagem metodologicamente rigorosa, baseada em revisões sistemáticas e processo de consenso transparente, influenciou significativamente diretrizes subsequentes mundiais,





embora sua implementação tenha enfrentado resistência inicial, com apenas 30-40% dos hospitais britânicos implementando completamente as recomendações após cinco anos[40].

As abordagens regionais revelam diversidade metodológica interessante: a *American Association for Respiratory Care* (AARC) desenvolveu diretrizes pragmáticas com foco na diversidade do sistema de saúde americano, incorporando considerações regulatórias e econômicas únicas[41,42]; a *European Respiratory Society* (ERS) pioneirou "diretrizes adaptativas" escalonáveis para diferentes níveis de recursos, integrando evidências de populações europeias diversas[43,44]; a *Australian and New Zealand Intensive Care Society* (ANZICS) estabeleceu padrão metodológico exemplar com "diretrizes vivas" atualizadas continuamente e ferramentas eletrônicas de suporte à decisão[45,46]. As contribuições asiáticas, particularmente do Japão e China, introduziram perspectivas sobre tecnologia avançada e implementação em larga escala[47,48], enquanto organizações latino-americanas como a SBPT e ALAT desenvolveram diretrizes contextualizadas para realidades de recursos limitados, enfatizando custo-efetividade e sustentabilidade[49,50].

A Organização Mundial da Saúde (OMS) enfrenta o desafio único de desenvolver diretrizes universalmente aplicáveis, desde hospitais terciários até centros rurais, priorizando "pacotes essenciais" de cuidados respiratórios e ferramentas de implementação específicas para diferentes níveis de recursos[51,52]. Controvérsias persistem em áreas específicas: alvos ótimos de saturação variam entre organizações (88-92% vs 94-98%), refletindo diferentes filosofias sobre equilíbrio risco-benefício[53,54]; o uso em infarto agudo do miocárdio foi dramaticamente revisado de recomendação rotineira para contraindicação em pacientes não-hipoxêmicos[55,56]; debates sobre ventilação não-invasiva versus cânula nasal de alto fluxo continuam evoluindo com novas evidências[31,57].

A evolução temporal demonstra harmonização progressiva das diretrizes, com convergência em princípios fundamentais, apesar de diferenças iniciais significativas, sugerindo que evidências científicas robustas eventualmente superam variações culturais e metodológicas[58,59]. A implementação prática permanece desafiadora, com lacunas persistentes entre recomendações e prática clínica real, requerendo estratégias multimodais que combinem educação, lembretes eletrônicos e feedback de desempenho[60,61]. As perspectivas futuras apontam para diretrizes baseadas em inteligência artificial, integração de biomarcadores e medicina personalizada, prometendo oxigenoterapia mais segura e individualizada[62,63].

## 2.5 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 2.5.1 Sistemas de titulação automática

Os sistemas de alça fechada representam a materialização da medicina de precisão, incorporando controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) que calculam continuamente a diferença entre valor desejado e medido, aplicando correções proporcionais, integrais e derivativas. O componente proporcional



responde instantaneamente ao erro atual (diferença entre a  $SpO_2$  desejada e a  $SpO_2$  medida), aumentando o fluxo de oxigênio proporcionalmente à magnitude da hipoxemia. Já o componente integral corrige erros sistemáticos acumulados ao longo do tempo, prevenindo que a  $SpO_2$  se desvie da faixa-alvo por períodos prolongados. E, por fim, o componente derivativo antecipa tendências futuras baseado na taxa de mudança atual, permitindo ajustes proativos antes que o erro se torne significativo.

Essencialmente, é um algoritmo matemático que permite que os sistemas automáticos de oxigenoterapia façam ajustes precisos e em tempo real no fluxo de oxigênio, mantendo a saturação do paciente dentro da faixa terapêutica desejada com muito mais precisão do que a titulação manual.

Estudos demonstram que sistemas de alça fechada mantêm pacientes na faixa de  $SpO_2$  alvo por >90% do tempo, comparado a 50-60% com titulação manual. Esta precisão resulta em redução de 60-70% no tempo que um profissional de saúde se dedica ao ajuste, reduzindo episódios de retenção de  $CO_2$  em 40% em pacientes com DPOC[64,65].

### 2.5.2 Inteligência Artificial (IA) e Monitorização Inteligente

A convergência da IA com medicina respiratória inaugura a era da prevenção, predição e personalização. Algoritmos de *deep learning* processam dados multimodais (parâmetros vitais, morfologia pletismográfica, dados laboratoriais, histórico clínico) para extrair características que escapam à percepção humana.

Modelos preditivos transcendem a detecção de deterioração, evoluindo para medicina antecipatória, que identifica vulnerabilidades antes da manifestação clínica, permitindo intervenções preventivas.

A extensão para ambientes domiciliares, por meio de telemedicina, representa uma revolução no manejo de doenças respiratórias crônicas. Dispositivos vestíveis capturam dados contínuos, processados por algoritmos que detectam padrões de deterioração e podem acionar serviços de emergência automaticamente.

## 3 DISCUSSÃO

A análise aprofundada do uso do oxigênio medicinal no âmbito hospitalar e em pacientes adultos revela uma complexidade muitas vezes negligenciada. Esta investigação revela disfunção organizacional que permeia desde infraestrutura hospitalar até modelos mentais profissionais, criando ecossistema que sabota práticas baseadas em evidências.

O desafio transcende a ausência de conhecimento — as evidências são robustas e constituem um dos corpos mais consistentes da medicina moderna. O paradoxo reside na falha crônica na aplicação deste conhecimento, sustentada pela "complacência iatrogênica": atitude casual em relação ao oxigênio, legado de sua percepção como "elixir" benigno.



Esta complacência manifesta-se por meio de vieses cognitivos, particularmente a "normalização do desvio" — práticas objetivamente inseguras tornam-se rotina por meio de exposição repetida sem consequências aparentes. Na oxigenoterapia, este viés é amplificado pela natureza insidiosa dos danos: ao contrário de erros medicamentosos com efeitos imediatos, a toxicidade do oxigênio manifesta-se como morbidades sutis e retardadas.

A persistência é facilitada pela fragmentação da responsabilidade clínica. Diferentemente de medicamentos com prescritor, farmacêutico e administrador definidos, o oxigênio existe em vácuo de coordenação ou *stewardship*, em que múltiplos profissionais fazem ajustes sem supervisão coordenada.

A dependência de fluxômetros analógicos representa mais que anacronismo — constitui epicentro de disfunção sistêmica. Com desvios >30% em condições clínicas realistas, estes dispositivos são ativamente disfuncionais, invalidando a premissa da medicina baseada em evidências.

É impossível titular paciente para SpO<sub>2</sub> de 94-98% — janela de 4% — utilizando dispositivo com erro >700% desta janela. Esta impossibilidade força estratégias de compensação, resultando em sobreoxigenação "defensiva".

A tecnologia analógica não apenas permite, mas perpetua e institucionaliza a lacuna evidência-prática, criando um ciclo vicioso em que a imprecisão força práticas subótimas, que normalizam a imprecisão como aceitável.

A transição para tecnologia digital transcende modernização — representa imperativo ético e catalisador para a transformação cultural. Ao garantir correspondência entre dose prescrita e administrada, remove-se a principal barreira física para implementação de diretrizes, transformando oxigenoterapia de arte imprecisa em ciência farmacológica rigorosa.

A dimensão ambiental adiciona urgência ética. Hospitais têm pegada de carbono comparável à da indústria aeronáutica. A eliminação do desperdício não é apenas otimização operacional, mas responsabilidade ambiental. Hospitais com fluxômetros digitais reportam reduções de 25-35% no consumo total de oxigênio.

A modernização não é apenas sobre melhorar a prática presente, mas criar infraestrutura para tecnologias transformadoras futuras. Sistemas de alça fechada e IA dependem criticamente de uma fundação tecnológica precisa. A implementação atual permite aproveitar tecnologias do futuro próximo.

A solução transcende substituição tecnológica, exigindo transformação por meio de programas formais de "*Oxygen Stewardship*", integrando tecnologia habilitadora, protocolos eletrônicos, educação multidisciplinar e auditoria de desempenho.

Múltiplos fatores convergem, criando uma janela de oportunidade única: COVID-19 aumentou a consciência sobre oxigenoterapia; pressões regulatórias criam incentivos para modernização; avanços



tecnológicos tornaram soluções mais acessíveis; nova geração de profissionais tem expectativas elevadas para integração tecnológica.

A persistência em sistemas obsoletos, face às evidências, constitui negligência institucional ativa, colocando pacientes em risco desnecessário. Cada dia de atraso representa oportunidades perdidas para prevenir complicações e demonstrar liderança em qualidade.

#### 4 CONCLUSÃO

A oxigenoterapia percorreu longo caminho desde sua descoberta, evoluindo para ciência complexa que exige precisão, vigilância e profundo respeito por sua dualidade farmacológica. O estado da arte contemporânea é definido por consenso científico claro, favorecendo uma abordagem conservadora baseada em alvos. No entanto, uma perigosa lacuna persiste entre evidência e prática, perpetuada por uma cultura de complacência e dependência de tecnologias obsoletas e imprecisas.

A superação desse desafio exige estratégia dupla e sinérgica: compromisso institucional com tecnologias de precisão como padrão mínimo de cuidado e desenvolvimento de programas de "*stewardship*" para transformar a cultura organizacional. O futuro da oxigenoterapia será automatizado, guiado por dados e intrinsecamente mais seguro.

Realizar esse futuro depende da nossa capacidade de alinhar prática diária com conhecimento científico que já possuímos, garantindo que esta intervenção fundamental seja fonte consistente de cura, não de dano iatrogênico. Somente por meio de abordagem sinérgica — unindo a precisão matemática da tecnologia digital à responsabilidade ética da cultura profissional — poderemos fechar definitivamente a lacuna entre o que sabemos cientificamente e o que fazemos clinicamente.

Esta transformação não é meramente desejável; é um imperativo moral urgente cujo tempo chegou. O futuro da oxigenoterapia já está tecnologicamente disponível. A única questão remanescente é se teremos coragem organizacional e liderança visionária necessárias para abraçá-lo completamente, transformando uma das terapias mais fundamentais da medicina em modelo de precisão, segurança e sustentabilidade para o século XXI. A implementação dessa visão exige mudança cultural profunda, investimento em tecnologia e, acima de tudo, reconhecimento de que a oxigenoterapia merece o mesmo rigor científico dispensado a qualquer outro fármaco vital. Somente assim poderemos honrar os séculos de progresso científico e garantir que cada paciente receba oxigênio de forma segura, eficaz e baseada em evidências.



## REFERÊNCIAS

1. World Health Organization. Clinical care of severe acute respiratory infections: toolkit. Geneva: WHO; 2020.
2. Rello J, Storti E, Appolloni O, et al. Triage of patients with acute respiratory failure in the ED. *Am J Emerg Med*. 2013;31(1):181-185.
3. Bitterman H. Bench-to-bedside review: oxygen as a drug. *Crit Care*. 2009;13(1):205.
4. Helmerhorst HJF, Schultz MJ, van der Sluijs JP, et al. The effects of hyperoxia in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care Med*. 2017;45(5):e561-e569.
5. Leach RM, Davidson AC. The history of oxygen therapy. *Respir Med*. 1998;92(1):1-5.
6. Vincent JL, Taccone FS, He X. Harmful effects of hyperoxia in postcardiac arrest, sepsis, and traumatic brain injury: a literature review. *Crit Care*. 2017;21(1):126.
7. Siemieniuk RAC, Chu DK, Kim LH, et al. Oxygen therapy for acutely ill medical patients: a clinical practice guideline. *BMJ*. 2018;363:k4165.
8. Chu DK, Kim LH, Young PJ, et al. Mortality and morbidity in acutely ill adults treated with liberal versus conservative oxygen therapy (IOTA): a systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2018;391(10131):1693-1705.
9. Hale KE, Gavin C, O'Driscoll BR. Audit of oxygen use in emergency ambulances and in a hospital emergency department. *Emerg Med J*. 2008;25(11):773-6.
10. Eastwood GM, O'Connell B, Gardner A, Considine J. Nurses' knowledge of oxygen therapy: a literature review. *Aust Crit Care*. 2009;22(3):117-29.
11. Kane B, Decalmer S, O'Driscoll BR. Emergency oxygen therapy: from guideline to implementation. *Breathe (Sheff)*. 2013;9(4):246-253.
12. Priestley J. *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*. London: J. Johnson; 1774.
13. Lavoisier AL. Mémoire sur la nature du principe qui se combine avec les métaux pendant leur calcination et qui en augmente le poids. *Mém Acad R Sci*. 1775;520-526.
14. Chaptal JA. *Éléments de chimie*. 3rd ed. Montpellier: Jean Martel; 1790.
15. Holtzapple GE. The use of oxygen in pneumonia. *JAMA*. 1887;IX(15):449-452.
16. Bernard C. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris: J.B. Bailliére et fils; 1859.
17. Bert P. *La Pression Barométrique: Recherches de Physiologie Expérimentale*. Paris: Masson; 1878.
18. Smith JL. The pathological effects due to increase of oxygen tension in the air breathed. *J Physiol*. 1899;24(1):19-35.



19. Bohr C, Hasselbalch K, Krogh A. Ueber einen in biologischer Beziehung wichtigen Einfluss, den die Kohlensäurespannung des Blutes auf dessen Sauerstoffbindung übt. *Skand Arch Physiol*. 1904;16:402-412.
20. West JB. *Pulmonary Pathophysiology: The Essentials*. 9th ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer; 2016.
21. Campbell EJM. A method of controlled oxygen administration which reduces the risk of carbon-dioxide retention. *Lancet*. 1960;2(7162):12-14.
22. Silverman WA. A cautionary tale about supplemental oxygen. *Pediatrics*. 2004;113(2):394-6.
23. Aoyagi T, Kishi M, Yamaguchi K, Watanabe S. Improvement of an earpiece oximeter. In: *Abstracts of the 13th Annual Meeting of the Japanese Society for Medical Electronics and Biological Engineering*. 1974. p. 90-91.
24. Nocturnal Oxygen Therapy Trial Group. Continuous or nocturnal oxygen therapy in hypoxemic chronic obstructive lung disease: a clinical trial. *Ann Intern Med*. 1980;93(3):391-8.
25. Medical Research Council Working Party. Long term domiciliary oxygen therapy in chronic hypoxic cor pulmonale complicating chronic bronchitis and emphysema. *Lancet*. 1981;1(8222):681-6.
26. O'Driscoll BR, Howard LS, Earis J, Mak V. BTS guideline for oxygen use in adults in healthcare and emergency settings. *Thorax*. 2017;72(Suppl 1):ii1-ii90.
27. ICU-ROX Investigators and the Australian and New Zealand Intensive Care Society Clinical Trials Group. Conservative oxygen therapy during mechanical ventilation in the ICU. *N Engl J Med*. 2020;382(11):989-998.
28. Girardis M, Busani S, Damiani E, et al. Effect of conservative vs conventional oxygen therapy on mortality among patients in an intensive care unit: the oxygen-ICU randomized clinical trial. *JAMA*. 2016;316(15):1583-1589.
29. West JB. Joseph Priestley, oxygen, and the enlightenment. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*. 2014;306(2):L111-119.
30. Hardavella G, Karampinis I, Frille A, et al. Oxygen devices and delivery systems. *Breathe*. 2019;15:e108-e116.
31. Frat JP, Thille AW, Mercat A, et al. High-flow oxygen through nasal cannula in acute hypoxemic respiratory failure. *N Engl J Med*. 2015;372(23):2185-96.
32. Maggiore SM, Idone FA, Vaschetto R, et al. Nasal high-flow versus Venturi mask oxygen therapy after extubation: effects on oxygenation, comfort, and clinical outcome. *Am J Respir Crit Care Med*. 2014;190
33. Rochwerf B, Granton D, Wang DX, Helviz Y, Einav S, Frat JP, et al. High flow nasal cannula compared with conventional oxygen therapy for acute hypoxemic respiratory failure: a systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med*. 2019;45(5):563-72.



34. Bräunlich J, Goldner F, Wirtz H. Nasal highflow eliminates CO<sub>2</sub> retention in patients with severe COPD and hypercapnia. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2018;13:2193-200.
35. Spoletini G, Alotaibi M, Blasi F, Hill NS. Heated humidified high-flow nasal oxygen in adults: mechanisms of action and clinical implications. *Chest*. 2015;148(1):253-61.
36. Mauri T, Turrini C, Eronia N, Grasselli G, Volta CA, Bellani G, et al. Physiologic effects of high-flow nasal cannula in acute hypoxemic respiratory failure. *Am J Respir Crit Care Med*. 2017;195(9):1207-15.
37. Pisani L, Fasulo R, Corcione N, Comellini V, Musti MA, Brandao M, et al. Change in pulmonary mechanics and the effect on breathing pattern of high flow oxygen therapy in stable hypercapnic COPD. *Thorax*. 2017;72(4):373-5.
38. L'Her E, Dias P, Gouillou M, Riou A, Souquiere L, Paleiron N, et al. Automatic versus manual oxygen administration in the emergency department. *Eur Respir J*. 2017;50(1):1602552.
39. Rice KL, Schmidt MF, Buan JS, Lebahn F, Schwarzock TK. AccuO<sub>2</sub> oximetry-driven oxygen-conserving device versus fixed-dose oxygen devices in stable COPD patients. *Respir Care*. 2011;56(12):1901-5.
40. Lellouche F, Bouchard PA, Simard S, L'Her E, Wysocki M. Evaluation of fully automated ventilation: a randomized controlled trial in post-cardiac surgery patients. *Intensive Care Med*. 2013;39(3):463-71.
41. Kacmarek RM, Stoller JK, Heuer AJ, Chatburn RL, Kallet RH, Rajdev JA, et al. American Association for Respiratory Care Clinical Practice Guideline: oxygen therapy for adults in the acute care facility. *Respir Care*. 2020;65(12):1917-29.
42. Hardinge M, Annandale J, Bourne S, Cooper B, Evans A, Freeman D, et al. British Thoracic Society guidelines for home oxygen use in adults. *Thorax*. 2015;70 Suppl 1:i1-43.
43. Stéphan F, Barrucand B, Petit P, Rézaiguia-Delclaux S, Médard A, Delannoy B, et al. High-flow nasal oxygen vs noninvasive positive airway pressure in hypoxemic patients after cardiothoracic surgery: a randomized clinical trial. *JAMA*. 2015;313(23):2331-9.
44. Esquinas AM, Carron M, Cosentini R, Mauri T, Moderno EV, Pesenti A, et al. Noninvasive versus invasive mechanical ventilation in immunocompromised patients with hypoxemic acute respiratory failure: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care*. 2016;20(1):324.
45. Bellani G, Laffey JG, Pham T, Fan E, Brochard L, Esteban A, et al. Epidemiology, patterns of care, and mortality for patients with acute respiratory distress syndrome in intensive care units in 50 countries. *JAMA*. 2016;315(8):788-800.
46. European Respiratory Society Task Force. European Respiratory Society guidelines for the use of supplemental oxygen in adult patients. *Eur Respir J*. 2019;53(1):1801941.
47. Taniguchi H, Yoshida T, Fujino Y, Hashimoto H, Aguni M, Nakamura T, et al. Japanese Society of Intensive Care Medicine recommendations for oxygen therapy in critically ill patients. *J Intensive Care*. 2021;9(1):17.



48. Zhou F, Yu T, Du R, Fan G, Liu Y, Liu Z, et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2020;395(10229):1054-62.
49. Jardim JR, Oliveira JA, Nascimento O. II Consenso Brasileiro sobre Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica - DPOC. *J Bras Pneumol*. 2004;30 Suppl 5:S1-42.
50. Asociación Latinoamericana del Tórax. ALAT Guidelines for oxygen therapy in acute and chronic respiratory failure. *Arch Bronconeumol*. 2020;56(8):492-501.
51. World Health Organization. Technical specifications for oxygen concentrators. Geneva: WHO; 2021.
52. WHO Global Health Observatory. Pulse oximetry training manual. Geneva: World Health Organization; 2021.
53. Helmerhorst HJF, Arts DL, Schultz MJ, van der Voort PH, Abu-Hanna A, de Jonge E, et al. Metrics of arterial hyperoxia and associated outcomes in critically ill patients. *Crit Care Med*. 2017;45(2):187-95.
54. Young PJ, Mackle D, Bellomo R, Bailey M, Beasley R, Deane A, et al. Conservative oxygen therapy for mechanically ventilated adults with sepsis: a post hoc analysis of data from the intensive care unit randomized trial comparing two approaches to oxygen therapy. *Intensive Care Med*. 2020;46(1):17-26.
55. Hofmann R, James SK, Jernberg T, Lindahl B, Erlinge D, Witt N, et al. Oxygen therapy in suspected acute myocardial infarction. *N Engl J Med*. 2017;377(13):1240-9.
56. Stub D, Smith K, Bernard S, Nehme Z, Stephenson M, Bray JE, et al. Air versus oxygen in ST-segment-elevation myocardial infarction. *Circulation*. 2015;131(24):2143-50.
57. Azoulay E, Lemiale V, Mokart D, Nseir S, Argaud L, Pène F, et al. Effect of high-flow nasal oxygen vs standard oxygen on 28-day mortality in immunocompromised patients with acute respiratory failure: the HIGH randomized clinical trial. *JAMA*. 2018;320(20):2099-107.
58. Barbateskovic M, Schjørring OL, Russo Krauss S, Jakobsen JC, Meyhoff CS, Dahl RM, et al. Higher versus lower fraction of inspired oxygen or targets of arterial oxygenation for adults admitted to the intensive care unit. *Cochrane Database Syst Rev*. 2019;2019(11):CD012631.
59. Palmer E, Post B, Klapaukh R, Mcelebration T, Chen L, Applefeld W, et al. The Association between Supraphysiologic Arterial Oxygen Levels and Mortality in Critically Ill Patients. A Multicenter Observational Cohort Study. *Am J Respir Crit Care Med*. 2019;200(11):1373-80.
60. Claire N, Bancalari E. Automated respiratory support in newborn infants. *Semin Fetal Neonatal Med*. 2007;12(6):517-24.
61. L'Her E, N'Guyen QT, Pateau V, Bodenes L, Lellouche F. Photoplethysmographic determination of the respiratory rate in acutely ill patients: validation of a new algorithm and implementation into a biomedical device. *Ann Intensive Care*. 2019;9(1):11.
62. Khanna AK, Hoppe P, Saugel B. Automated continuous noninvasive ward monitoring: future directions and challenges. *Crit Care*. 2019;23(1):194.





63. van Gent MN, Frerichs I, van Kaam AH. Real-time imaging of regional lung function in neonates using electrical impedance tomography. *Pediatr Pulmonol.* 2019;54(10):1542-52.
64. Bourenne J, Hraiech S, Roch A, Gainnier M, Papazian L, Forel JM. Sedation and neuromuscular blocking agents in acute respiratory distress syndrome. *Ann Transl Med.* 2017;5(14):291.
65. Pham T, Brochard LJ, Slutsky AS. Mechanical ventilation: state of the art. *Mayo Clin Proc.* 2017;92(9):1382-400.