

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA PROGRESSÃO DE EXERCÍCIOS NA DOENÇA PULMONAR OBSTRUTIVA CRÔNICA

BARRETO, Ana Cristina Lopes y Glória¹; EVERTON, Adriana Nunes da Fonseca²; BRASIL, Roxana Macedo³; BRITO, Diogo de Freitas^{1,4,5}; CARVALHO JUNIOR, Sergio⁶; FAIAL, Vanessa Esteves⁷; JUNIOR, Homero da Silva Nahum^{1,8}.

Resumo

Esse estudo objetivou modelar a progressão de exercícios físicos para indivíduos com DPOC pela programação dinâmica. O banco de dados guardava registros de quatro anos sobre 79 pessoas (61 mulheres), acumulados nas variáveis desfecho anual, capacidade respiratória e força. Os indivíduos detiveram as características Idade = $65,15 \pm 8,31$ anos, Capacidade Respiratória Inicial = $2,12 \pm 0,87$ e Força Inicial = $2,36 \pm 0,72$. A codificação foi desenvolvida em Python 3.13.7, empregando aprendizagem de máquina. O modelo propôs os seguintes incrementos: Ano 1 em frequência e volume; Anos 2 e 4 em volume e densidade; e Ano 3 em frequência e intensidade. Assim, a conclusão foi pela adequação da implementação.

Palavras-chave: Pesquisa operacional. Matemática. Planejamento. Saúde. Treinamento.

Abstract

This study aimed to model the progression of physical exercise for individuals with COPD using dynamic programming. The database contained four years of records on 79 people (61 women), accumulated on the variables annual outcome, respiratory capacity, and strength. The individuals had the following characteristics: Age = 65.15 ± 8.31 years, Initial Respiratory Capacity = 2.12 ± 0.87 , and Initial Strength = 2.36 ± 0.72 . The coding was developed in Python 3.13.7, employing machine learning. The model proposed the following increments: Year 1 in frequency and volume; Years 2 and 4 in volume and density; and Year 3 in frequency and intensity. Thus, the conclusion was that the implementation was adequate.

Keywords: Operational research. Mathematics. Planning. Health. Training.

¹ Docentes do Curso de Educação Física do Centro Universitário Celso Lisboa;

² Profissional de Educação Física da Adriana Nunes Consultoria de Corrida;

³ Docente Ph.D. em Educação Física;

⁴ Docente do Curso de Gestão Desportiva e do Lazer do Centro Universitário Celso Lisboa;

⁵ Consultor Iceberg Business Academy;

⁶ Pesquisador convidado Biodesa;

⁷ Graduanda do Curso de Educação Física do Centro Universitário Celso Lisboa;

⁸ Docente da Escola de Saúde da Universidade Cândido Mendes.

Introdução

A Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) seria caracterizada pela mitigação crônica e progressiva do fluxo de ar, como na bronquite crônica e enfisema, portanto, relevante causa de morbidade e mortalidade. Comumente, o comprometimento do tecido pulmonar ocorreria por inflamação das vias aéreas, apoptose (morte celular programada, ocorreria autodestruição organizada), desequilíbrio no sistema protease-antiprotease (enzimas degradadoras de proteínas e respectivos inibidores) e estresse oxidativo, esse danificaria as estruturas e intensificaria as ocorrências anteriores (Cavalcante e Bruin, 2009). Tal quadro clínico resultaria no assolamento de funcionalidade e autonomia, desencadeando perda precoce de produtividade, e aumento dos custos de internação (Rodrigues *et al.*, 2019; Ginó, 2023).

Não raramente, a identificação na espirometria forçada de fluxos médios e terminais mais lentos seria indicação de DPOC, manifestos na redução no Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo (VEF1) e na relação com a Capacidade Vital Forçada (CVF), $VEF1/CVF < 0,70$, após a utilização de broncodilatador (Teixeira, 2023; Albuquerque *et al.*, 2025). Entretanto, a existência de obstrução anteriormente ao uso do medicamento, seguida da ausência após o emprego, indicaria elevação na chance de desenvolver DPOC em, aproximadamente, 6,20 vezes (Buhr *et al.*, 2022). Todavia, indivíduos asmáticos poderiam apresentar tal comportamento. Essa inadequação seria consequência de modelos não logarítmicos de predição (Albuquerque *et al.*, 2025). O quadro se agravaria pelo fato de que broncodilatadores careceriam de eficiência na atenuação da progressão da DPOC (Cavalcante e Bruin, 2009).

A complexidade da doença abarcaria a saúde psíquica, porque, ansiedade e depressão contribuiriam para a elevação do risco de hospitalização por exacerbação grave ou mortalidade, o que tenderia a ser potencializado na ausência de relações sociais, dado que essas seriam preditoras dos transtornos citados. Então, a eficácia cognitiva poderia influenciar aspectos como autocuidado e adesão à terapia. Os hábitos alimentares, também, seriam recepcionados no fenômeno complexo, dado que haveria associação entre tabagismo e consumo de gordura saturada, alimentos ultraprocessados, carne e açúcar, em detrimento da ingestão de vegetais, frutas, peixes e gorduras saudáveis. O conjunto de interveniências receberia o regime de sono, uma vez que distúrbios seriam recorrentes nos acometidos, talvez pela redução da concentração de oxigênio no sangue (saturação de oxigênio abaixo do normal, 96,00%-97,00% = *dessaturação* noturna de oxigênio), o que

alimentaria as exacerbações. Pelo exposto, as intervenções deveriam promover o abandono do tabagismo, a higiene do sono e suplementação de oxigênio (Faria *et al.*, 2023).

A disponibilização de cuidados paliativos domiciliares diminuiria o quantitativo de hospitalizações, tendo aceitação adequada, especialmente no processo de fim de vida, mas não guardaria eficácia terapêutica, talvez pela intervenção tardia (Santos *et al.*, 2025). O contraponto estaria na terapia respiratória, proporcionando reduções de sintomas, fadiga e dispneia pela melhora da troca gasosa e função pulmonar, elevando a qualidade de vida e tolerância ao exercício físico (Teles *et al.*, 2025). Nesse tópico, o treinamento de alta intensidade seria recomendado, particularmente com o emprego de oxigênio suplementar quando necessário, *dessaturação* no esforço, em que pese, a escassez de investigações sobre a baixa saturação de oxigênio induzida pelo exercício (Rocha, 2025).

Outro aspecto a ser considerado seria a prática regular de exercícios físicos, cuja associação à DPOC se relacionaria aos possíveis desfechos, embora, a relevância à reabilitação pulmonar fosse reconhecida (Faria *et al.*, 2023), investigações envolvendo modalidades ou incrementos anuais de carga (sob frequência, volume, densidade ou intensidade) não alicerçaram diretrizes sólidas. Porque, a redução do risco de hospitalizações foi identificada como consequência de maior quantidade de exercícios físicos de baixa intensidade (Donaire-Gonzalez *et al.*, 2015), tanto quanto com qualquer faixa de intensidade (Garcia-Aymerich *et al.*, 2006).

De toda sorte, considerando que na senescência seriam abrandados o desempenho muscular respiratório; fluxo de tosse (Lowery *et al.*, 2013); a capacidade de difusão por mudanças alvéolo-capilares e mecânicas pulmonares (Burtscher *et al.*, 2022); função imunológica (Angelidis *et al.*, 2019); e regeneração de células-tronco pulmonares (Salminen, 2020), paralelamente à ampliação de disfunção mucociliar (Lowery *et al.*, 2013); incompatibilidade entre ventilação e perfusão (Burtscher *et al.*, 2022); secreção de citocinas pró-inflamatórias (Angelidis *et al.*, 2019); e disfunção mitocondrial (Salminen, 2020). Aspectos esses que dilatariam a taxa de declínio pulmonar, a qual tenderia ser impulsionada por fatores modificáveis como o sedentarismo (Vaz *et al.*, 2025).

Especificamente, na ocorrência de DPOC, conjuntamente à função pulmonar, a musculatura esquelética apresentaria disfunção (Bui *et al.*, 2019), logo, idealmente, o estilo de vida ativo deveria promover a VEF1, CVF (Strasser, Siebert e Schobersberger, 2013), capacidade de exercício, qualidade de vida e controle sobre a doença (Deus, 2017; Moço,

2020; Toledo *et al.*, 2025), e negativamente a dispneia e fadiga (Vaz *et al.*, 2025). Para tanto, necessários seriam treinos aeróbicos e de força adaptados à gravidade e às comorbidades (Gonçalves e Couto, 2021; Girão, Cardelis e Pinto, 2017; Toledo *et al.*, 2025), considerando por recomendação, intensidade moderada por 150 – 300 minutos semanais ou alta por 75 - 150 minutos semanais (*American College of Sports Medicine*, 2018). Então, o objetivo do estudo foi desenvolver um modelo de programação dinâmica para progressão de exercícios físicos voltados aos indivíduos com DPOC.

Metodologia

O modelo deveria maximizar a capacidade respiratória e força muscular, limitando o incremento de carga ao intervalo de 20,00% a 40,00% ao ano. Imperativamente, o conceito de carga seria o estímulo e estresse fisiológico imposto, podendo ser dividida em 1) interna, resposta individual, como frequências cardíaca e respiratório, e esforço percebido; e 2) externa, o exercício em si, influenciado por volume, intensidade, frequência e densidade. A progressão compulsoriamente obedeceu à ordem seguinte 1) frequência: organização de volume e intensidade, por exemplo número de dias semanais e determinação do que seria treinado em cada dia; 2) volume: quantidade de trabalho, exemplificando, número de séries x repetições; 3) densidade: esforço/descanso; e 4) intensidade dificuldade (Ananias, 2023). Considerou-se, também, a versatilidade de carga à resistência aeróbica, alternando métodos contínuos e intervalados, ou cargas contínuas e descontínuas; e à força, variando quantidade de séries, repetições, tempo de recuperação ou intensidade do exercício. Tais considerações convergiram ao princípio da sobrecarga, a carga de treinamento teria característica crescente (Pinto, 2022).

A implementação se deu sobre um banco de dados com 79 pessoas, 61 mulheres, todos tabagistas, com registros de quatro anos (208 semanas) e desfecho anual como melhora, inalterado e piora. A capacidade respiratória e força constavam com classificações entre 1 (muito baixa) e 5 (excelente). Os indivíduos detiveram as características Idade = $65,15 \pm 8,31$ anos (Mediana = 65,00 anos; Coeficiente de Variação = 12,76%), Capacidade Respiratória Inicial = $2,12 \pm 0,87$ (Mediana = 2,00; Coeficiente de Variação = 41,04%) e Força Inicial = $2,36 \pm 0,72$ (Mediana = 2,00; Coeficiente de Variação = 30,51%).

A codificação foi desenvolvida em Python 3.13.7, utilizando as bibliotecas NumPy 2.0.0, Pandas 2.2.2, SciPy 1.15.2, SymPy 1.14.0 e Py-Memoize 3.1.1. Utilizou-se a aprendizagem de máquina para desenvolver o modelo, então o banco de dados foi dividido

em treino, teste e validação, tendo respectivamente, 70,00%, 20,00% e 10,00% dos registros, aproximadamente. Avaliado quanto à representatividade do conjunto original e as seguintes métricas de desempenho (Bishop, 2006; James *et al.*, 2013): Acurácia, quantidade de predições corretas em relação ao total predito; Precisão, quantidade de predições positivas corretas em relação ao total de positivos preditos; Sensibilidade, proporção de predições positivas corretas; F-Score, média harmônica entre Precisão e Sensibilidade (Brasil, 2025); e AUC-ROC, capacidade de distinção entre classes positivas e negativas, ou seja, a probabilidade de classificar corretamente uma ocorrência positiva como mais provável que uma negativa (Rachakonda e Bhatnagar, 2021).

Finalmente, realizada a predição por “re-amostragem” (*bootstrapping*) com simulação de 1.000 ocorrências (Efron, 1979; Wolf, 2025), realizando a distribuição de frequência por desfecho e sexo, e a análise de sensibilidade e robustez em razão da variação de incrementos. Tal mecanismo se fez necessário, pois o banco de dados era pequeno, a complexidade do fenômeno estudado, e a dispensa de suposições sobre a distribuição de probabilidade dos dados (Grunkemeier e Wu, 2004; Hesterberg, 2011; Aldawsari, Coolen e Coolen-Maturi, 2025).

Resultados e Discussão

O Estado do Sistema (s_t) dependeria da semana de treinamento ($t \in [1; 208]$), Capacidade Respiratório em t ($CR_t \in [1; 5]$) e Força em t ($FM_t \in [1; 5]$), e das variáveis de treino Frequência em t (F_t), Volume em t (V_t), Densidade em t (D_t) e Intensidade em t (I_t). Portanto, a função de valor ótimo seria aquela que maximizaria o s_t (II). Entretanto, isso dependeria da quantificação do benefício ou custo de realização de determinada Ação (a_t) em certo Estado (s_t), o que foi expresso pela Função de Recompensa (III).

$$s_t = (CR_t, FM_t, F_t, V_t, D_t, I_t, t) \quad (I)$$

$$V(s_t) = \max\{a_t \in A(s_t)\} [R_{(s_t, a_t)} + \gamma \cdot E[V(s_{(t+1)}) \mid s_t, a_t]] \quad (II)$$

$$R_{(s_t, a_t)} = \alpha \cdot \Delta CR + \beta \cdot \Delta FM - \lambda \cdot \text{Risco}(s_t, a_t) \quad (III)$$

A (III) demonstrou associação com as variações da Capacidade Respiratório ($\Delta CR = CR_{(t+1)} - CR_t$, exemplo $t = 100$, $CR_{100} = 2,10$ e $CR_{101} = 2,50$, então $\Delta CR = 2,50 - 2,10 = +0,40$, logo Melhora) e Força (ΔFM), indicando o ganho ou a perda na variável fisiológica

no intervalo temporal considerado. No caso da última variável, tal consideração seria relevante dada a tendência de desenvolvimento de sarcopenia (Tonel *et al.*, 2025; Albuquerque *et al.*, 2025), logo, pragmaticamente, poderia ser tomado como marcador de qualidade de vida (Trevisan, Porto e Pinheiro, 2010; Silva *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2015; Machado, Corrêa e Rabahi, 2019). Na ciência de que, a prioridade do acometido pela DPOC residiria na respiração, então atribuiu-se maior peso à ΔCR ($\alpha = 0,60$) comparativamente à ΔFM ($\beta = 0,40$). No cotidiano, eventos adversos ocorrem (citando fadiga excessiva), em vista disso, o termo $Risco(s_t, a_t)$ representaria a probabilidade dessa ocorrência, a qual demandou o coeficiente de penalização para ações de elevado risco ($\lambda = 0,30$). Exemplificadamente: caso determinada ação apresentasse 20,00% de risco de exacerbação, a penalidade imposta seria 0,06 ($= \lambda \cdot Risco(s_t, a_t) = 0,30 \cdot 0,20$).

Na reabilitação respiratória, os ganhos seriam cumulativos, dessarte requisitaria valorização ao longo do domínio do tempo, e intervenções com durações acima de 52 semanas apresentariam resultados mais duradouros (Vrieling, 2015; Lima, 2022), com base no exposto, o fator de desconto foi imposto como $\gamma = 0,95$ (II). Esse parâmetro seria o fator de valorização de recompensas futuras versus as imediatas. Clinicamente, quando elevado preveniria exarcebações, favorecendo a progressão paulatina e o planejamento de longo prazo. Em oposição, se detentor de baixo valor, valorizaria melhorias rápidas, potencializando a ocorrência de treinamentos excessivos (*overtraining*) e ignorando o efeito cumulativo. O Quadro I exemplifica o funcionamento das recompensas imediata e futura.

Quadro I: Funcionamento das Recompensas Imediata e Futura, $\gamma = 0,95$.

Semana	Imediata	Futura	Total
1	$R_1 = 0,50$	$R_1 \cdot \gamma^0 = 0,50 \cdot 1 = 0,50$	0,50
2	$R_2 = 0,80$	$R_2 \cdot \gamma^1 = 0,80 \cdot 0,95 = 0,76$	$0,50 + 0,76 = 1,26$
3	$R_3 = 1,00$	$R_3 \cdot \gamma^2 = 1,00 \cdot 0,95^2 = 0,90$	$1,26 + 0,90 = 2,16$

Fonte: Os Autores (2026).

Tendo como base de cálculo, os dados históricos dos 79 indivíduos, a Função de Transição (IV) foi estimada para modelar a progressão entre estados, fornecendo a probabilidade correspondente, para tanto resultou da composição do “produtório” (ou “piatório” (\prod), multiplicação de uma sequência de números) e das probabilidades condicionais das variáveis fisiológicas. O primeiro reconheceu que os indivíduos eram independentes entre si, isto posto, a transição de estado seria o produto de transições individuais.

$$P(s_{(t+1)} | s_t, a_t) = \prod_{(i=1)}^{79} P(CR_{(i,t+1)} | CR_{(i,t)}, a_t) \cdot P(FM_{(i,t+1)} | FM_{(i,t)}, a_t) \quad (IV)$$

A probabilidade condicional da capacidade respiratória ($P(CR_{(i,t+1)} | CR_{(i,t)}, a_t)$) refletiria o alcance de determinada condição respiratória em certo tempo, partindo do estado respiratório atual sob determinada ação. Por exemplo, se $CR_2 = 3$ e $a_2 =$ “aumentar em 30,00% o volume”, para $CR_3 = 4$ então $P(CR_{(1,3)} | CR_{(1,2)}, a_2) = 60,00\%$. A probabilidade condicional da força ($P(FM_{(i,t+1)} | FM_{(i,t)}, a_t)$) modelou a resposta muscular ao treinamento, reconhecendo que haveria influência de variáveis como sexo, idade, estado nutricional, histórico de exercícios e condição de sono, dentre outras. Ilustrando com a situação inicial determinada por $CR_{(i,t)} = 2$ e $FM_{(i,t)} = 2$, com $a_t =$ “aumentar a frequência para 3 dias/semana”, as probabilidades condicionais poderiam ser as constantes no Quadro II.

Quadro II: Exemplificação das Probabilidades Condicionais das Variáveis Fisiológicas.

Condição Inicial	Probabilidade Condicional
$CR_{(i,t)} = 2$	$P(CR_{(t+1)} = 3 CR_t = 2, a_t) = 0,70$
	$P(CR_{(t+1)} = 2 CR_t = 2, a_t) = 0,30$
$FM_{(i,t)} = 2$	$P(FM_{(t+1)} = 3 FM_t = 2, a_t) = 0,60$
	$P(FM_{(t+1)} = 2 FM_t = 2, a_t) = 0,40$

Fonte: Os Autores (2026).

Pelo exposto, o modelo permitiria selecionar a ação que maximizaria os benefícios futuros, considerando cada estado do indivíduo, assim possibilitando que a decisão fosse efetivamente otimizada. O estabelecimento de equilíbrio entre melhoras, imediatas e de longo prazo, permitiu o balanceamento entre risco e benefício. A probabilidade de transição recepcionou as características individuais, favorecendo a personalização do treinamento. Para além, necessário foi avaliar o desempenho do modelo, requisitou-se testar a similaridade ao banco de dados, comprovando a ausência de diferença estatística, valor-p > 0,05 (Tabela 1). Necessário seria salientar que Idade foi previamente submetida ao teste de Kolmogorov-Smirnov (Banco de Dados, valor-p = 0,68; e Treino, valor-p = 0,44) e Shapiro-Wilk (Teste, valor-p = 0,53; e Validação, valor-p = 0,19), $\alpha = 0,05$.

Todas as Métricas de Desempenho foram satisfatórias e convergiram às expectativas, mitigação da média e elevação da variabilidade entre os grupos Treino e Validação, dado o menor quantitativo de representantes (Tabela 2). Os testes de normalidade indicaram proximidade à Normal (valor-p > 0,05), então imposta foi a Anova

às estimativas de desempenho revelou diferença estatística, valor-p < 0,05, subsequentemente, o Teste de Tukey HSD indicou que Treino era distinto em todas as situações, exceto em relação à Sensibilidade de Teste, talvez pela precisão numérica adotada (Tabela 3).

Tabela 1: Resultados dos Testes t-Student* para Grupos Independentes, Qui-quadrado# e Wilcoxon**, $\alpha = 0,05$.

Parâmetro	Idade*, anos	Mulheres#, %	CR Inicial**	FM Inicial**
Banco de Dados	65,15 ± 8,31	77,22%	2,12 ± 0,87	2,36 ± 0,72
Treino, n = 55	64,81 ± 7,94	76,36%	2,03 ± 0,73	2,25 ± 0,64
Valor-p	0,71	0,90	0,42	0,38
Teste, n = 16	65,02 ± 5,01	75,00%	2,26 ± 0,56	2,43 ± 0,45
Valor-p	0,83	0,81	0,55	0,52
Validação, n = 8	65,75 ± 4,49	75,00%	1,96 ± 0,51	2,49 ± 0,39
Valor-p	0,87	0,83	0,75	0,37

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 2: Resultados das Métricas de Desempenho do modelo.

Tipo	Acurácia	Precisão	Sensibilidade	F-Score	AUC-ROC
Treino, n = 55	0,87 ± 0,03	0,85 ± 0,04	0,88 ± 0,03	0,86 ± 0,03	0,92 ± 0,02
Teste, n = 16	0,82 ± 0,05	0,80 ± 0,06	0,83 ± 0,05	0,81 ± 0,05	0,89 ± 0,04
Validação, n = 8	0,79 ± 0,07	0,77 ± 0,08	0,80 ± 0,07	0,78 ± 0,07	0,86 ± 0,05

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 3: Resultados de Anova (F; valor-p) e Teste de Tukey HSD (Δ Médias; valor-p), $\alpha = 0,05$.

Métrica	Anova	Treino-Teste	Treino-Validação	Tese-Validação
Acurácia	4,32; 0,02	-0,05; 0,04	-0,08; 0,01	-0,03; 0,22
Precisão	3,98; 0,02	-0,05; 0,04	-0,08; 0,01	-0,03; 0,24
Sensibilidade	4,15; 0,02	-0,05; 0,05	-0,08; 0,01	-0,03; 0,23
F-Score	4,08; 0,02	-0,05; 0,04	-0,08; 0,01	-0,03; 0,23
AUC-ROC	5,21; 0,01	-0,03; 0,04	-0,06; 0,01	-0,07; 0,07

Fonte: Os Autores (2026).

Esses resultados legitimaram as recomendações anuais do modelo (Tabela 4), que pese o objetivo primário, melhora da CR, conquistasse evolução positiva mais discreta que a FM, o que poderia ser resultado do tabagismo e comprometimentos fisiológicos inerentes ao hábito (Liras *et al.*, 2007; Berto, Carvalhaes e Moura, 2010; Feitosa, 2018; Oliveira *et al.*, 2023; Boaretto, 2024). Isso poderia explicar, mesmo que parcialmente, a atenuação de melhoras entre 15,00% e 20,00% identificado pelo modelo naqueles indivíduos que mantinham o tabagismo contínuo. Extrapolando a análise, a adesão ao programa de exercícios tendeu ao decaimento nos cenários com incrementos superiores a 35,00%

anuais. Ratificando a expectativa, o grupo feminino teria lenta progressão de força comparativamente ao masculino.

Tabela 4: Recomendações do Modelo à Progressão Anual de Treinamento.

Variáveis	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4
Frequência	+25,00% (2-3 dias/sem)		+20,00% (3-4 dias/sem)	
Volume	+22,00% (20-25'/sessão)	+30,00% (25-33'/sessão)		+38,00% (33-46'/sessão)
Densidade		+28,00% (↓descanso)		+25,00% (↑treino)
Intensidade			+35,00% (carga exercícios)	
CR	+0,80	+0,61	+0,94	+0,74
FM	+0,72	+0,82	+1,00	+0,94

Fonte: Os Autores (2026).

O modelo identificou que ao findar o quadriênio, os resultados médios do grupo se substancializaram na melhoria da CR e FM, respectivamente em $3,00 \pm 0,45$ (Mediana = 3,00; Coeficiente de Variação = 15,00%) e $3,40 \pm 0,42$ (Mediana = 3,00; Coeficiente de Variação = 14,71%), e 72,15% dos participantes completaram o programa de exercícios. Focando no público feminino, as conquistas referentes às variáveis fisiológicas foram CR = $2,93 \pm 0,31$ (Mediana = 3,00; Coeficiente de Variação = 10,58%) e FM = $3,23 \pm 0,48$ (Mediana = 3,00; Coeficiente de Variação = 14,86%), enquanto no masculino, CR = $3,25 \pm 0,63$ (Mediana = 3,50; Coeficiente de Variação = 19,38%) e FM = $3,82 \pm 0,62$ (Mediana = 4,00; Coeficiente de Variação = 16,23%).

Os resultados tiveram pontos sensíveis como a sequência da obediência ao princípio da sobrecarga, refletido nos incrementos hierárquicos (frequência – volume – densidade – intensidade), o que representou 23,68% eficácia acima de outra ordem. O equilíbrio entre progressão e adesão foi otimizado com incrementos entre 28,00% e 32,00%. E, a alternância entre métodos contínuos e intervalados superou o emprego desses isoladamente em 18,73% da CR.

Focando na aplicação dos resultados no cotidiano profissional voltado ao público do estudo, possível seria sugerir o foco nos primeiros 18 meses na frequência e volume de treinamento, porém mantendo a combinação de exercícios aeróbicos e de força. Com esse norte, a simulação de predição com 1.000 pessoas foi desenvolvida, os desfechos preditos indicaram que haveria Piora no quadro clínico em 7,50% do grupo, estabelecido o intervalo

de confiança de 95,00% (Tabela 5), sem diferença estatisticamente significativa pela dicotomia sexual (Tabela 6).

Tabela 5: Desfechos Preditos por Simulação, $\alpha = 0,05$.

Desfecho	n	%	IC 95,00%
Melhora	647	64,70%	[61,20%; 68,10%]
Inalterado	278	27,80%	[24,80%; 30,80%]
Piora	75	7,50%	[5,80%; 9,20%]

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 6: Distribuição de Desfechos Preditos por Simulação pela Dicotomia Sexual, $\chi^2(2) = 5,87$; valor-p = 0,05; $\alpha = 0,05$.

Sexo	Melhora	Inalterado	Piora
Mulheres, n = 772	488; 63,21%	225; 29,15%	59; 7,64%
Homens, n = 228	159; 69,74%	53; 23,25%	16; 7,02%

Fonte: Os Autores (2026).

Finalmente, a análise de sensibilidade foi realizada considerando as variações com incrementos distintos (Tabela 7), tendo o intervalo incremental [20,00%; 25,00%] com referência (base), corroborou-se as observações realizadas, particularmente no condizente ao Incremento Anual > 35,00%, no qual o risco de perda de adesão se elevaria.

Tabela 7: Análise de Sensibilidade e Robustez do Grupo de Simulação.

Incremento Anual, %	Melhora, %	Piora, %	Risco Relativo
[20,00; 25,00]	58,30%	5,20%	1,00
[26,00; 35,00]	64,70%	7,50%	1,44
[36,00; 40,00]	69,10%	12,30%	2,37

Fonte: Os Autores (2026).

A Regressão Logística (Tabela 8) possibilitou avaliar a intensidade da associação entre variáveis, especificamente entre exposição e desfecho, denominada Razão de Chance (*Odds Ratio*). Sexo = Masculino e Adesão conquistaram OR > 1,00, significando que seriam fatores de proteção (Godinho *et al.*, 2024), ou em outras palavras, homens e o comportamento disciplinado com relação à prescrição de exercícios proporcionariam maiores probabilidades de Melhora. Assim, reforçada estaria a necessidade de suporte psicossocial (Campos, 2002; Faria *et al.*, 2024), investigação sociocultural (Devóglgio, 2015; Ferreira, 2024; Portes *et al.*, 2025) e consideração sexual na intervenção (Rabahi, 2013; Albuquerque *et al.*, 2025).

Tabela 8: Resultados da Regressão Logística Multivariada, $\alpha = 0,05$.

Variável	Razão de Chance - OR	IC 95,00%	Valor-p
Idade	0,97	[0,95; 0,99]	0,01
Sexo, Masculino	1,34	[1,02; 1,76]	0,04
CR Inicial	0,72	[0,58; 0,89]	0,00
Adesão	2,45	[1,88; 3,19]	0,00
Tabagismo Ativo	0,61	[0,47; 0,79]	0,00

Fonte: Os Autores (2026).

Tabagismo Ativo, CR Inicial e Idade detiveram $OR < 1,00$ (Tabela 8), caracterizando-os como fatores de risco (Moreira *et al.*, 2025). A primeira variável, $OR = 0,61$ seria aquela detentora do desfecho mais severo, o que poderia sugerir a incorporação de orientações e políticas para abandono ou redução do hábito, destacadamente pelo decaimento das expectativas de recuperação do DPOC (Cedrim *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2023). A CR Inicial dilui as possibilidades de melhora, muito embora a percepção de benefícios tenderia a guardar relação direta com o comprometimento primeiro (Trevisan, Porto e Pinheiro, 2010; Tonel *et al.*, 2025). Apesar do efeito significativo da Idade ($\text{valor-p} = 0,01$), esse era pequeno, pois se $OR = 1,00$, a associação seria inexistente. Mas, os resultados indicaram que cada ano vivido reduziria a probabilidade de Melhora, então, considerar o processo de senescência seria imperativo, tanto quanto a realização de adaptações em função de possíveis comorbidades comumente presentes no envelhecimento (Faria *et al.*, 2024; Holak *et al.*, 2025; Fontanela *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025; Moreira *et al.*, 2025). A FM não foi considerada na simulação como relevante ao modelo logístico multivariado, característica inerente ao grupo simulado por *bootstrapping*.

A simulação confirmou a robustez do modelo, particularmente entre grupos distintos, dada a elevada capacidade preditiva, assim a eficácia foi mantida com os dados simulados. Novamente, constatou-se que os aspectos críticos seriam a adesão ao programa de exercícios e o tabagismo, logo dotados de capacidade de interferir nos desfechos. Os resultados foram potencializados em incrementos entre 26,00% e 35,00%, quando também foram equilibrados o risco e benefício, conforme ocorrido anteriormente. Em última análise, o modelo poderia identificar indivíduos com elevada probabilidade de Piora e propor progressões personalizadas.

As características negativas residiram na necessidade de validação externa e em coortes independentes, ou seja, utilizando outros bancos de dados com indivíduos caracteristicamente distintos daqueles do original, cujo tamanho era pequeno. O conjunto

de variáveis intervenientes poderia ser mais amplo, criando subgrupos de risco. A necessidade de ajuste dinâmico seria latente e requisitaria monitoramento contínuo.

Considerações Finais

Objetivando desenvolver um modelo de programação dinâmica para progressão de exercícios físicos, um banco de dados com 79 indivíduos com DPOC foi utilizado. O modelo demonstrou a possibilidade melhoras significativas na capacidade funcional daquelas pessoas, desde que o programa de exercícios sistematizasse a progressão, respeitando a hierárquica das variáveis de treinamento e a individualidade biológica, sobretudo no condizente às limitações fisiológicas. Concluiu-se, então que o modelo foi satisfatoriamente implementando.

Aos estudos futuros recomenda-se refinar o modelo com base em avaliações periódicas, 12 semanas, o que possibilitaria o refinamento dos incrementos propostos. Associar essa ideia à modelagem por séries temporais deve favorecer a individualização da prescrição, gerando dados ao refinamento do modelo. A pormenorização dos resultados pode ser alcançada adequadamente com o detalhamento dos treinamentos aeróbico (caminhada, natação e esteira, por exemplo) e força (musculação, levantamento olímpico e calistênico, dentre outros) utilizados.

Referências

- ALBUQUERQUE, ALP *et al.* Novas recomendações de espirometria da Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia-atualização 2024. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 50, n. 6, p. e20240169, 2025.
- ALDAWSARI, AMA; COOLEN, FPA; COOLEN-MATURI, T. A novel parametric predictive bootstrap method. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, p. 1-21, 2025. <https://doi.org/10.1080/03610926.2025.2553732>
- AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE. **ACSM's guidelines exercise testing and prescription**. Philadelphia (USA): Lippincott Williams & Wilkins, 2025.
- ANANIAS, GEO. **Relação entre carga de treinamento agudo/crônico e perfil metabólico em atletas de futebol profissional**: uma abordagem prática. Dissertação (Mestrado em Nutrição) — Programa de Pós-Graduação em Nutrição. Faculdade de Nutrição. Universidade Federal de Alagoas, Maceió (AL), 2023.
- ANGELIDIS, I *et al.* An atlas of the aging lung mapped by single cell transcriptomics and deep tissue proteomics. **Nature Communications**, v. 10, a. e963, 2019.
- BERTO, SJP; CARVALHAES, MABL; MOURA, EC. Tabagismo associado a outros fatores comportamentais de risco de doenças e agravos crônicos não transmissíveis. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 26, n. 8, p. 1573-1582, 2010.

- BISHOP, CM. **Pattern recognition and machine learning**. New York (USA): Springer, 2006.
- BOARETTO, N *et al.* Tabagismo: Consequências cardiorrespiratórias. **Boletim do Curso de Medicina da UFSC**, v. 10, n. 1, p. 5-12, 2024.
- BRASIL, RM *et al.* Fundamentos e aplicação de redes neurais artificiais à saúde e humanidades – parte I. **Revista Presença**, v. 11, n. 26, p. 405-419, 2025.
- BUHR, RG *et al.* Reversible airflow obstruction predicts future chronic obstructive pulmonary disease development in the SPIROMICS Cohort: an observational cohort study. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 206, n. 5, p. 554-556, 2022.
- BUI, K-L *et al.* The relevance of limb muscle dysfunction in chronic obstructive pulmonary disease: A review for clinicians. **Clinics in Chest Medicine**, v. 40, n. 2, p. 367-383, 2019.
- BURTSCHER, J *et al.* Does regular physical activity mitigate the age-associated decline in pulmonary function? **Sports Medicine**, v. 52, n. 5, p. 963-970, 2022.
- CAMPOS, HS. DPOC na cabeça. **Boletim de Pneumologia Sanitária**, v. 10, n. 2, p. 49-56, 2002.
- CAVALCANTE, AGM; BRUIN, PFC. O papel do estresse oxidativo na DPOC: conceitos atuais e perspectivas. **Jornal brasileiro de Pneumologia**, v. 35, n. 12, p. 1227-1237, 2009.
- CEDRIM, PCAS *et al.* Tabagismo e a histologia do pulmão. **SEMPESq-Semana de Pesquisa da Unit-Alagoas**, n. 9, 2021.
- DEUS, CAL. **Associação entre inhomogeneidade na ventilação, anormalidade de pequenas vias aéreas e intolerância ao exercício em pacientes com DPOC**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Reabilitação) – Programa de Pós-graduação em Ciências da Reabilitação. Centro Universitário Augusto Motta. Rio de Janeiro, 2017.
- DEVÓGLIO, LL. **Avaliação do significado social, econômico e cultural do tabagismo em mulheres profissionais do sexo**. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) - Faculdade de Medicina de Botucatu. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Botucatu (SP), 2015.
- DONAIRE-GONZALEZ, D *et al.* Benefits of Physical Activity on COPD Hospitalisation Depend on Intensity. **The European Respiratory Journal**, v. 46, n. 5, p. 1281-1289, 2015.
- EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. **The Annals of Statistics**, v. 7, n. 1, p. 1 - 26, 1979.
- FARIA, RR *et al.* Os seis pilares da Medicina do estilo de vida no manejo de doenças não transmissíveis – as lacunas nas diretrizes atuais. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 120, n. 12, e20230408, 2023.
- FEITOSA, ACN. Alterações hematológicas correlacionadas ao tabagismo. **Brazilian Journal of Clinical Analyses**, v. 50, n. 2 supl 2, p. 14, 2018.
- FERREIRA, CFT. **Prevalência de doenças crônicas em estudantes universitários portugueses: relações com saúde percebida e fatores de risco e proteção**. 2024. Dissertação (Mestrado em Psicologia Social e das Organizações) – Departamento de Psicologia Social e das Organizações. ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa. Lisboa (Portugal), 2024.
- FONTANELA, LC *et al.* Prevalência do tratamento fisioterapêutico em adultos mais velhos com doença pulmonar obstrutiva crônica: resultados do ELSI-Brasil. **Physiotherapy**, v. 16, p. e00082025, 2025.
- GARCIA-AYMERICH, J *et al.* Regular physical activity reduces hospital admission and mortality in chronic obstructive pulmonary disease: a population based cohort study. **Thorax**, v. 61, n. 9, p. 772-778, 2006.

GINÓ, ASC. **A capacitação para a autogestão na doença pulmonar obstrutiva crônica no domicílio.** Relatório de Estágio de Mestrado em Enfermagem de Reabilitação. Escola Superior de Enfermagem de Lisboa. Lisboa (Portugal), 2023.

GIRÃO, MPF; CARDELIS, LAS; PINTO, AA. Efeito do exercício físico em pacientes com DPOC: Uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 13, e47121344193, 2023.

GODINHO, ALI *et al.* Insuficiência cardíaca entre a alimentação e o exercício físico. **Revista Presença**, v. 10, n. 22, p. 189-208, 2024.

GONÇALVES, APF; COUTO, VF. Efeitos da atividade física sobre a doença pulmonar obstrutiva crônica: uma revisão de literatura. **Lecturas: Educación Física y Deportes**, v. 25, n. 274, p. 196-208, 2021.

GRUNKEMEIER, GL; WU, YX. Bootstrap resampling methods: something for nothing? **The Annals of Thoracic Surgery**, v. 77, n. 4, p. 1142-1144, 2004.

HESTERBERG, T. Bootstrap. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 3, n. 6, p. 497-526, 2011.

HOLAK, MCPF *et al.* Avaliação clínica e abordagem dos fatores de risco da doença pulmonar obstrutiva crônica na população idosa. **Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)**, v. 18, n. 8, e9601, 2025.

JAMES, G *et al.* **An introduction to statistical learning:** with applications in R. New York (USA): Springer, 2013.

LIMA, VMS. **Fisioterapia no pós-operatório de transplante pulmonar:** revisão integrativa da literatura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Fisioterapia) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia (GO), 2022.

LIRAS, A *et al.* Tabaquismo: fisiopatología y prevención. **Revista de Investigación Clínica**, v. 59, n. 4, p. 278-89, 2007.

LOWERY, EM *et al.* The aging lung. **Clinical Interventions in Aging**, v. 8, p. 1489-1496, 2013.

MACHADO, FRL; CORRÊA, KS; RABAHI, MF. Efeitos do exercício físico combinado na dispnéia, capacidade funcional e qualidade de vida de pacientes com DPOC em uma clínica privada. **Brazilian Journal of Respiratory, Cardiovascular and Critical Care Physiotherapy**, v. 2, n. 2, p. 19-28, 2019.

MOÇO, VJR. **Programa de exercícios domiciliares melhora as atividades de vida diária, a qualidade de vida, a percepção do estado de saúde e dispneia de pacientes com doença pulmonar obstrutiva crônica.** Tese (Doutorado Acadêmico em Ciências da Reabilitação) – Programa de Pós-graduação em Ciências da Reabilitação. Centro Universitário Augusto Motta. Rio de Janeiro, 2020.

MOREIRA, ACB *et al.* Modelo logístico polinomial de indivíduos com ansiedade e depressão. **Revista Presença**, v. 11, n. 26, p. 29-44, 2025.

MOREIRA, GG *et al.* Relação entre hábitos não saudáveis com a qualidade de vida da população jovem e seu envelhecimento. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 25, p. e19196, 2025.

OLIVEIRA, IEG *et al.* A relação entre o tabagismo e a Doença Obstrutiva Pulmonar Crônica: uma revisão de literatura. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 3, p. 10837-10848, 2023.

PINTO, ECS. Periodização e estratégias de treinamento. In. GUIMARÃES, TT. (Org.) **Excesso de exercício físico?** São José dos Pinhais (SP): Editora Brazilian Journals, 2022, p. 124-154.

PORTES, AM *et al.* Perfil dos participantes do programa de cessação de tabagismo do Hospital Universitário da Universidade Federal do Maranhão em São Luís-MA. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 25, n. 5, p. e20209, 2025.

RABAHI, MF. Epidemiologia da DPOC: enfrentando desafios. **Pulmão RJ**, v. 22, n. 2, p. 4-8, 2013.

RACHAKONDA, AR; BHATNAGAR, A. A ratio: Extending area under the ROC curve for probabilistic labels. **Pattern Recognition Letters**, v. 150, p. 265-271, 2021.

ROCHA, BLC *et al.* **Uso de oxigênio suplementar em indivíduos com doenças respiratórias crônicas nos programas de reabilitação pulmonar da América Latina**. Tese (Doutorado em Ciência da Reabilitação) – Programa de Pós-graduação em Ciências da Reabilitação. Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte (MG), 2025.

RODRIGUES, HR *et al.* Capacidade funcional em indivíduos com doença pulmonar obstrutiva crônica em uma cidade do alto Paranaíba-MG. **Psicologia e Saúde em debate**, v. 5, n. 2, p. 68-81, 2019.

SALMINEN, A. Activation of immunosuppressive network in the aging process. **Ageing Research Reviews**, v. 57, e.100998, 2020.

SANTOS, GS *et al.* Cuidados paliativos domiciliares às doenças e agravos não transmissíveis. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 25, n. 5, p. e20541-e20541, 2025.

SANTOS, K *et al.* Relação entre força muscular periférica e respiratória e qualidade de vida em pacientes com doença pulmonar obstrutiva crônica. **Medicina (Ribeirão Preto)**, v. 48, n. 5, p. 417-424, 2015.

SILVA, AC *et al.* Prognóstico da capacidade cardiorrespiratória na insuficiência cardíaca por meio do teste de esforço: Revisão narrativa. **Enfermagem Brasil**, v. 24, n. 4, p. 2749-2765, 2025.

SILVA, CMS *et al.* Avaliação da atividade de vida diária no paciente com doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC). **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 14, n. 3, p. 267-273, 2015.

STRASSER, B; SIEBERT, U; SCHOBERSBERGER, W. Effects of resistance training on respiratory function in patients with chronic obstructive pulmonary disease: A systematic review and meta-analysis. **Sleep and Breathing**, v. 17, n. 1, p. 217-226, 2013.

TEIXEIRA, EM. **Análise das alterações da mecânica respiratória nos diferentes fenótipos da Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica e sua relação com desempenho funcional**. Dissertação (Mestrado em Ciências Médicas) – Faculdade de Ciências Médicas. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

TELES, LSV *et al.* A atuação e a eficácia da fisioterapia respiratória em pacientes com a doença pulmonar obstrutiva crônica. **Revista Liberum accessum**, v. 17, n. 1, p. 34-48, 2025.

TOLEDO, LC *et al.* Efeitos do treinamento físico na percepção de felicidade em indivíduos com DPOC: protocolo de um ensaio clínico randomizado e controlado. **Brazilian Journal of Respiratory, Cardiovascular and Critical Care Physiotherapy**, v. 16 e00112025, 2025.

TONEL, JB *et al.* Functional capacity, health impact, and risk of sarcopenia in individuals with chronic obstructive pulmonary disease. **Acta Scientiarum Health Sciences**, v. 47, p. e70249, 2025.

TREVISAN, ME; PORTO, AS; PINHEIRO, TM. Influência do treinamento da musculatura respiratória e de membros inferiores no desempenho funcional de indivíduos com DPOC. **Fisioterapia e Pesquisa**, v. 17, n. 3, p. 209-213, 2010.

VAZ, S *et al.* A Influência da atividade física na capacidade respiratória de indivíduos com comprometimento ventilatório. In CRUZ, AG; NEVES, HL; PAROLA, VSO (coord.). **Atividade física**

– um conceito central da Enfermagem de reabilitação. Unidade de Investigação em Ciências da Saúde: Enfermagem. Escola Superior de Enfermagem de Coimbra. Coimbra (Portugal), 2025, p. 105-121.

VRIELINK, GD. **Fatores determinantes para exacerbação da doença pulmonar obstrutiva crônica em pacientes em acompanhamento ambulatorial.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Fisioterapia) - Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC. Santa Cruz do Sul (RS), 2015.

WOLF, M. Comments on: “Bootstrap Inference for Group Factor Models”. **Journal of Financial Econometrics**, v. 23, n. 2, p. nbae022, 2025.