

## **“Modelo Matemático na Avaliação e Controlo do Treino”. Contributo para o estudo da potência e capacidade dos sistemas energéticos de atletas de alto rendimento**

### **Autores**

João Beckert <sup>1, 2</sup>

Pedro Mendes <sup>3</sup>

Ricardo Minhalma <sup>4</sup>

Ricardo Silvestre <sup>2</sup>

Francisco Alves <sup>4</sup>

Nuno Neuparth <sup>1</sup>

[joabeckert@gmail.com](mailto:joabeckert@gmail.com)

### **Resumo**

A melhoria do rendimento do atleta depende do planeamento e administração de treino e requer a monitorização dos seus efeitos. A avaliação do atleta inclui a recolha de dados antropométricos, bioquímicos, ergométricos e ainda a avaliação da prestação no terreno ou em competição. A interpretação destes dados é um desafio para o treinador, devido à complexidade do sistema fisiológico.

Para resolver este problema, desenvolveu-se um modelo de simulação do comportamento fisiológico de atletas em diversas condições de exercício. Este modelo matemático representa a ligação entre os sistemas energéticos (aeróbio, anaeróbio láctico e aláctico) e descreve os seus comportamentos no tempo. O modelo permite: (1) calcular os valores da resposta simulada do atleta; (2) comparar os valores da simulação com valores reais, obtidos em recolhas; (3) estudar o efeito da variação de fatores determinantes do treino nos resultados do modelo e, assim, otimizar o planeamento do treino.

A validade do modelo é demonstrada pela precisão da simulação em relação aos dados registados no laboratório.

Num exemplo de estudo de cenários, a uma variação simulada de 6 ml de consumo de oxigénio máximo por minuto, por kg de peso (CV de 9.5%) está associada à estimação de lactato sanguíneo entre 2.6 e 6.0 mmol /l (CV 22.2%), indicadora de efeitos de treino em diferentes domínios de intensidade.

Conclui-se que o modelo é uma ferramenta útil na abordagem científica ao treino desportivo. O modelo tem aplicabilidade em múltiplas áreas da fisiologia humana, em condições de saúde ou doença, na altitude e outros.

<sup>1</sup> CEDOC - Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Nova de Lisboa – Universidade Nova de Lisboa

<sup>2</sup> Instituto Português do Desporto e Juventude, I.P.

<sup>3</sup> Centro de Engenharia e Tecnologia Naval – Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa

<sup>4</sup> CIPER, Faculdade de Motricidade Humana, Universidade de Lisboa

## INTRODUÇÃO

O desempenho desportivo do atleta depende do planeamento, aplicação e supervisão do processo de treino.

A avaliação e o controlo do treino são etapas importantes porque cada novo ciclo de planeamento, com vista à melhoria dos resultados observados, se baseia na comparação entre estes e os efeitos esperados. A melhoria do desempenho pressupõe o conhecimento dos mecanismos de resposta, adaptação (ou falência) do organismo aos estímulos de treino administrados.

A resposta ao treino integra a influência dos fatores ambientais, externos ao sujeito (por ex. altitude, equipamento desportivo), com os fatores pessoais (por ex. idade, sexo, condição de saúde) e ainda as dimensões das "estruturas e funções do corpo" (adotando a linguagem da Classificação Internacional de Funcionalidade (*ICF Short version*, 2001)). O resultado desportivo, depende, portanto, de múltiplos fatores que constituem um sistema complexo com interações mútuas.

A avaliação do atleta é baseada nas atividades de competição, na análise de componentes dessas atividades (por ex. velocidade de deslocação), no registo das "funções do corpo" (por ex. frequência cardíaca, ventilação, parâmetros bioquímicos) e na medição de "estruturas do corpo" (por ex. composição corporal). A seleção e interpretação destes dados de natureza ergométrica, fisiológica, bioquímica e antropométrica é um desafio para o treinador.

O problema abordado nesta investigação é a resposta a este desafio, através da sistematização e descrição do funcionamento do sistema fisiológico durante o exercício físico. Em particular, o objetivo é adaptar e desenvolver um modelo matemático do comportamento fisiológico em exercício enquanto ferramenta que permita calcular e prever a capacidade e potência dos sistemas energéticos e, contribuir para a melhoria do planeamento de treino.

A simulação matemática do comportamento fisiológico remonta aos finais do séc. XIX. Nos finais dos anos sessenta do sec. XX, Arthur Guyton *et col.* apresentaram um modelo sofisticado do balanço hidro eletrolítico. Nos nossos dias decorrem projetos ambiciosos como o "Physiome Project", para a modelação de sistemas e subsistemas biológicos de diferentes escalas espacial e temporal (Hunter & Borg, 2003).

Os modelos matemáticos de prognóstico e de evolução no tempo, baseados nos princípios mecânicos e fisiológicos fundamentais devem ser usados para análise e interpretação dos dados fisiológicos, de acordo com as orientações referidas no "Road map for Medical Research in the 21st Century" do National Institutes of Health, citado por Beard (Beard, Basingthwaite, & Greene, 2005). Os autores consideram que "esta abordagem é vantajosa em relação à simples exposição de dados em termos estatísticos" ou dos modelos matemáticos descritivos que apenas exprimem relações numéricas entre quantidades e variáveis de um sistema (quer sejam modelos estatísticos complexos ou apenas simples formulas empíricas).

O modelo matemático é baseado na adaptação do trabalho publicado por Mader (Mader, 2003) e nos trabalhos de Cabrera e Lai (Lai, Camesasca, Saidel, Dash, & Cabrera, 2007). O modelo de Mader constitui uma excelente base para se desenvolver a abordagem dos sistemas energéticos e o estudo do comportamento dos lactatos no compartimento

sanguíneo, enquanto os modelos de Lai incluem a descrição do comportamento da concentração de oxigénio no compartimento tecidual e a sua regulação vascular.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Recolha de dados laboratoriais em atletas

Os procedimentos de recolha laboratorial de dados decorreram da normal atividade do laboratório no apoio ao processo de avaliação e controlo do treino dos atletas de alto rendimento, i.e. foram efetuados com um carácter não-experimental.

Um grupo de 10 atletas de triatlo participou num estágio de preparação para os Campeonatos da Europa nas categorias de sub-23 e sub-19.

Estes atletas realizaram uma avaliação em ciclo ergómetro, num protocolo de patamares de 1 min, com intensidade crescente de 30W. Nestas provas foram usados os equipamentos habituais da avaliação de atletas (ventilógrafo com analisador de gases, cardio-frequencímetro e oxímetro de onda de pulso) a que foi acrescida a sonda de oximetria tecidual por espectroscopia na banda de quase infravermelhos (“*NIRS-near infrared spectroscopy*”).

Os atletas realizaram um treino em laboratório com uma frequência semanal, cumprindo um programa de exercício em ciclo ergómetro constituído por períodos de 6 min a intensidade constante, alternando a intensidade nos domínios moderado-pesado-moderado, terminando o treino com exercício de intensidade severa. Os treinos em laboratório foram monitorizados com os mesmos equipamentos usados nas provas de avaliação laboratorial

### Adaptação e desenvolvimento do modelo

O desenvolvimento do modelo fisiológico foi efetuado com recurso a um *software* concebido para operar com modelos de sistemas dinâmicos, Vensim PLE (Ventana Systems UK Ltd). A interface gráfica do *software* permite a representação das estruturas dos modelos usando uma quantidade reduzida de símbolos. O diagrama estrutural resultante descreve, por sua vez, o sistema de equações diferenciais que exprimem as relações pretendidas entre as variáveis.

O valor das variáveis de interesse é representado pelo nível de um “reservatório” cujo comportamento ao longo do tempo depende do balanço entre as entradas e saídas. O modelo descreve relações entre as seguintes variáveis endógenas:

- (1) Concentração de oxigénio no compartimento capilar e tecidual
- (2) Débito sanguíneo muscular
- (3) Consumo tecidual de oxigénio
- (4) Concentração de fosfatos de alta energia na célula muscular
- (5) Capacidade anaeróbia láctica
- (6) Concentração do lactato no compartimento sanguíneo
- (7) Concentração do lactato no compartimento muscular

O comportamento das soluções das equações do sistema fisiológico pode ser representado por gráficos das variáveis ao longo do tempo ou séries temporais.

As variáveis exógenas identificam as condições de exercício e altitude para as quais se estuda o comportamento do sistema e constituem o *input* do modelo. São, respetivamente, as séries temporais “Trabalho realizado durante o exercício” (W) e “Pressão parcial do oxigénio no sangue arterial” (PO<sub>2</sub>art).

Depois de construir o modelo com as equações do processo fisiológico, torna-se necessário estabelecer a validade da estrutura do modelo (“identificação estrutural”) e estimar os valores numéricos para os diferentes parâmetros do modelo (“estimação paramétrica”).

Alguns dos parâmetros correspondem a medições feitas no laboratório a cada atleta e, quando introduzidas na simulação personalizam o modelo:

- (1) Peso corporal
- (2) Percentagem de massa corporal
- (3) Consumo máximo de oxigénio
- (4) Eficiência do atleta em exercício
- (5) Constante em tempo da cinética de consumo de oxigénio
- (6) Concentração de hemoglobina no sangue
- (7) Hematócrito

As constantes de equilíbrio de reações químicas ou o valor da concentração de mioglobina admitem-se como idênticas para todos os atletas e provêm de diferentes fontes bibliográficas (Lai, Dash, Nasca, Saidel, & Cabrera, 2006).

Uma vez provada a validade e precisão do modelo por comparação com os valores de comportamentos reais, passa-se à avaliação de cenários com a alteração uni ou multivariada de parâmetros e a simulação de diferentes tipos de exercício ou níveis de altitude

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estimação paramétrica

Os valores dos parâmetros medidos em laboratório que foram utilizados na simulação personalizada para um dos atletas e os parâmetros selecionados por Mader (Mader, 2003) constam da Tabela I.

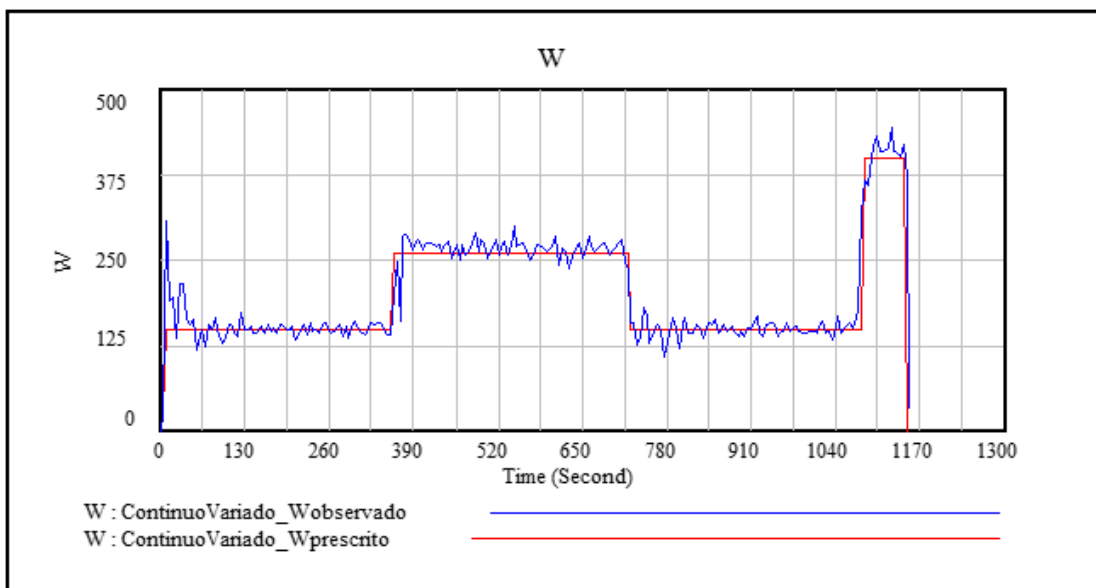
**TABELA I:** Valores dos parâmetros usados nas simulações

Variáveis		Valores do atleta na simulação personalizada	Valores em Mader (2003)
Peso corporal	Kg	76.00	70.00
Percentagem de massa corporal	%	63.00	30.00
Consumo de O <sub>2</sub> em repouso	l/min	0.454	0.40
Consumo máximo de O <sub>2</sub>	l/min	4.58	3.30
Custo energético O <sub>2</sub>	l/min/W	21.3	--
Constante em tempo da cinética de consumo de oxigénio	s	17.4	15.00
Concentração de hemoglobina no sangue	mg/dl	14.70	--
Hematócrito	%	41.30	--

### Comportamento do modelo face ao modo de referência

O modelo reproduz corretamente o comportamento esperado do sistema fisiológico quando os valores do trabalho prescrito aos atletas e do trabalho registado no ciclo ergómetro são introduzidos no modelo como variáveis exógenas. O exemplo do trabalho em exercício contínuo variado é apresentado na Figura 1.

**Figura 1:** Trabalho na simulação de exercício contínuo variado (CV)

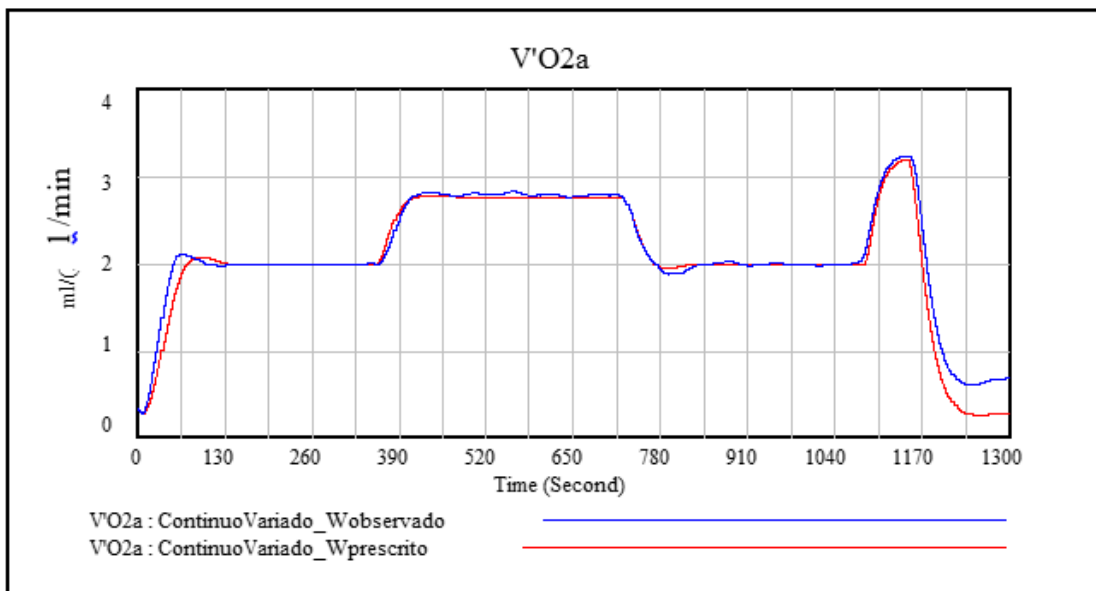


O gráfico representa os valores introduzidos para a variável exógena “W” em duas simulações do modelo fisiológico. No eixo das ordenadas, apresentam-se os valores do

trabalho (Watt\*min). "W\_ContínuoVariado\_Wprescrito" corresponde à intensidade de esforço solicitada a um atleta numa sessão de treino contínuo variado, constituído por 3 períodos de treino com duração de 6 min a intensidade moderada (160W), pesada (260W) e, novamente, moderada (160W) e um quarto período a 380W, até a exaustão. "W\_ContínuoVariado\_Wobservado" corresponde ao trabalho registado num cicloergómetro "SRM" em laboratório com esse atleta, quando realizou a sessão de treino referida.

As séries temporais do "Consumo de oxigénio" ( $\dot{V}O_{2a}$ ) referentes a essas simulações são apresentadas na Figura 2.

**Figura 2:** Consumo de oxigénio em treino simulado



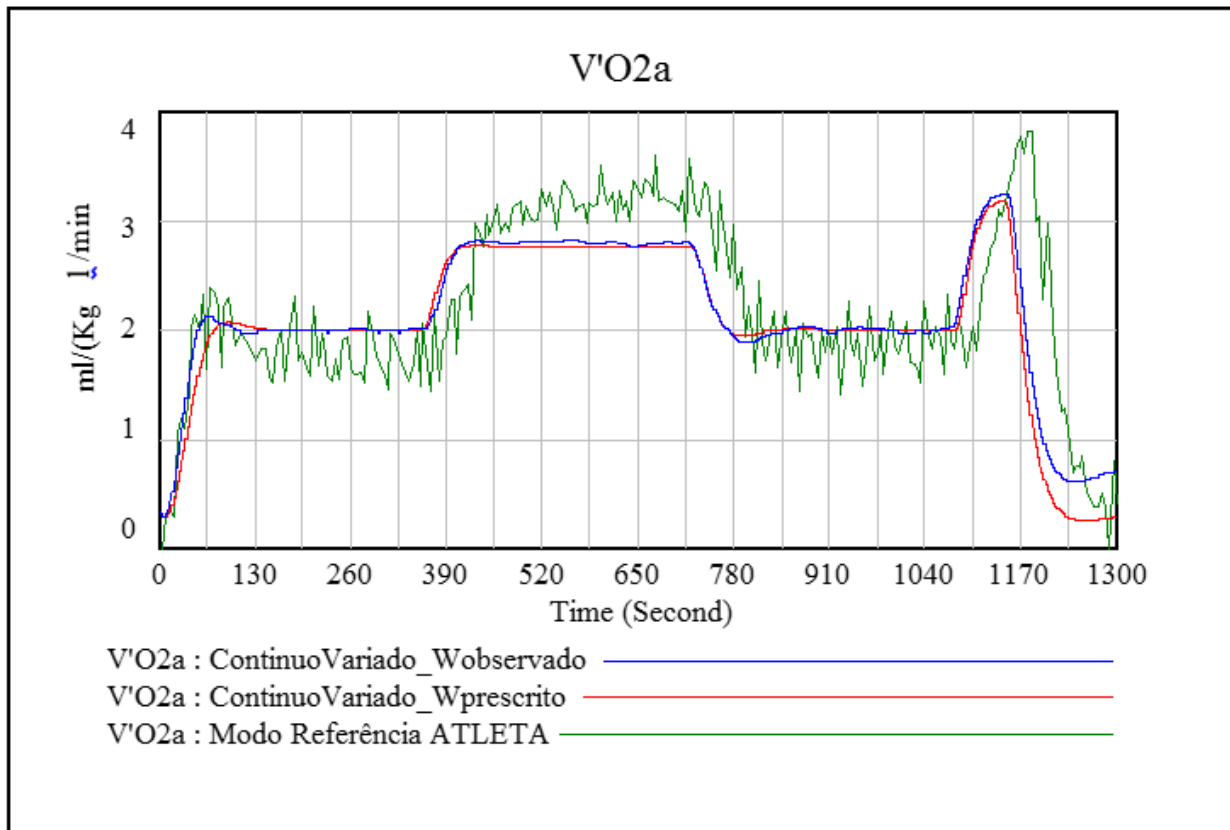
O gráfico representa o comportamento do consumo de oxigénio ( $\dot{V}O_{2a}$ ) calculado em duas simulações correspondentes ao valor do trabalho apresentado na figura anterior. No eixo das ordenadas, apresentam-se os valores de  $\dot{V}O_{2a}$  (l/min).

" $\dot{V}O_{2a}$ \_ContínuoVariado\_Wprescrito" corresponde ao  $\dot{V}O_{2a}$  calculado com base no exercício prescrito.

" $\dot{V}O_{2a}$ \_ContínuoVariado\_Wobservado" corresponde ao  $\dot{V}O_{2a}$  calculado com base no exercício registado em laboratório, quando realizou a sessão de treino prescrita.

Os valores  $\dot{V}O_{2a}$  calculados nas simulações não apresentam diferenças com os dados registados no laboratório, para uma tolerância de 0.01 (função *Compare Runs*, Vensim), confirmadas por reduzidos desvio padrão (0.239 referente simulação de  $\dot{V}O_2$  para "Wobservado" e 0.32 para "Wprescrito" (Figura 3).

**Figura 3:** Comportamento do modelo face ao modo de referência



O gráfico representa o comportamento do consumo de oxigénio ( $V'O_2a$ ) calculado em duas simulações em relação aos valores do  $V'O_2$  registados na monitorização de uma sessão de treino em laboratório.

No eixo das ordenadas, apresentam-se os valores de  $V'O_2$  (l/min).

O hiato temporal que se observa nas transições é de cerca 10-12 s, verossímil com o que é descrito para a resposta pulmonar e o acontecimento muscular.

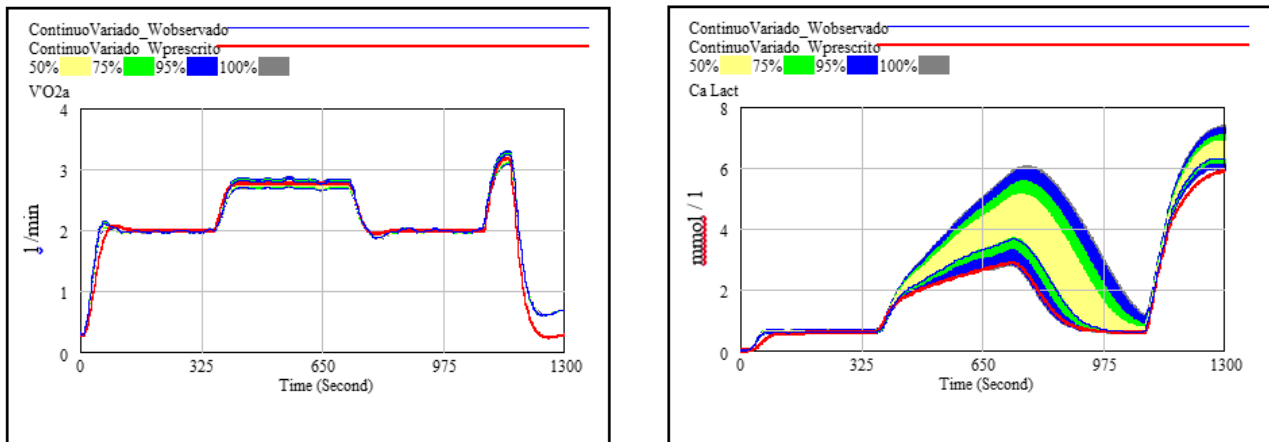
" $V'O_2a\_ContinuoVariado\_Wprescrito$ " corresponde ao  $V'O_2a$  calculado com base no exercício prescrito.

" $V'O_2a\_ContinuoVariado\_Wobservado$ " corresponde ao  $V'O_2a$  calculado com base no exercício registado em laboratório, quando realizou a sessão de treino prescrita.

### Estudo de sensibilidade

O efeito da variação do parâmetro "Consumo máximo de oxigénio" ( $V'O_2max$ ) foi avaliado em relação ao comportamento do  $V'O_2a$  e da "Concentração do lactato no compartimento sanguíneo" (Ca Lact) (Figura 4).

**Figura 4:** Efeito do  $V'O_{2max}$  no  $V'O_{2a}$  (4.a) e na concentração de lactato sanguíneo (4.b).



O gráfico representa o resultado do estudo da variação do parâmetro  $V'O_{2max}$  no comportamento do  $V'O_2$  e da concentração de lactato sanguíneo (Ca Lact) durante a simulação do exercício contínuo variado apresentado na Fig 1 (estudo de sensibilidade).

No eixo das ordenadas, apresentam-se os valores de  $V'O_2$  (l/min), na Figura 4.a e do Ca Lact (mmol / l) na Fig. 4.b. A simulação foi replicada 200 vezes para cada um dos valores de  $V'O_{2max}$ , admitindo uma amostragem com distribuição normal, média de 63 ml/Kg, no intervalo de 60 e 66, dispersão de 3 vezes o desvio padrão.

"ContinuoVariado\_Wprescrito" corresponde ao  $V'O_{2a}$  (Fig 4.a) ou Ca Lact (Fig. 4.b) calculado com base no exercício prescrito.

"ContinuoVariado\_Wobservado" corresponde ao  $V'O_{2a}$  (Fig 4.a) ou Ca Lact (Fig. 4.b) calculado com base no exercício registado em laboratório, quando realizou a sessão de treino prescrita.

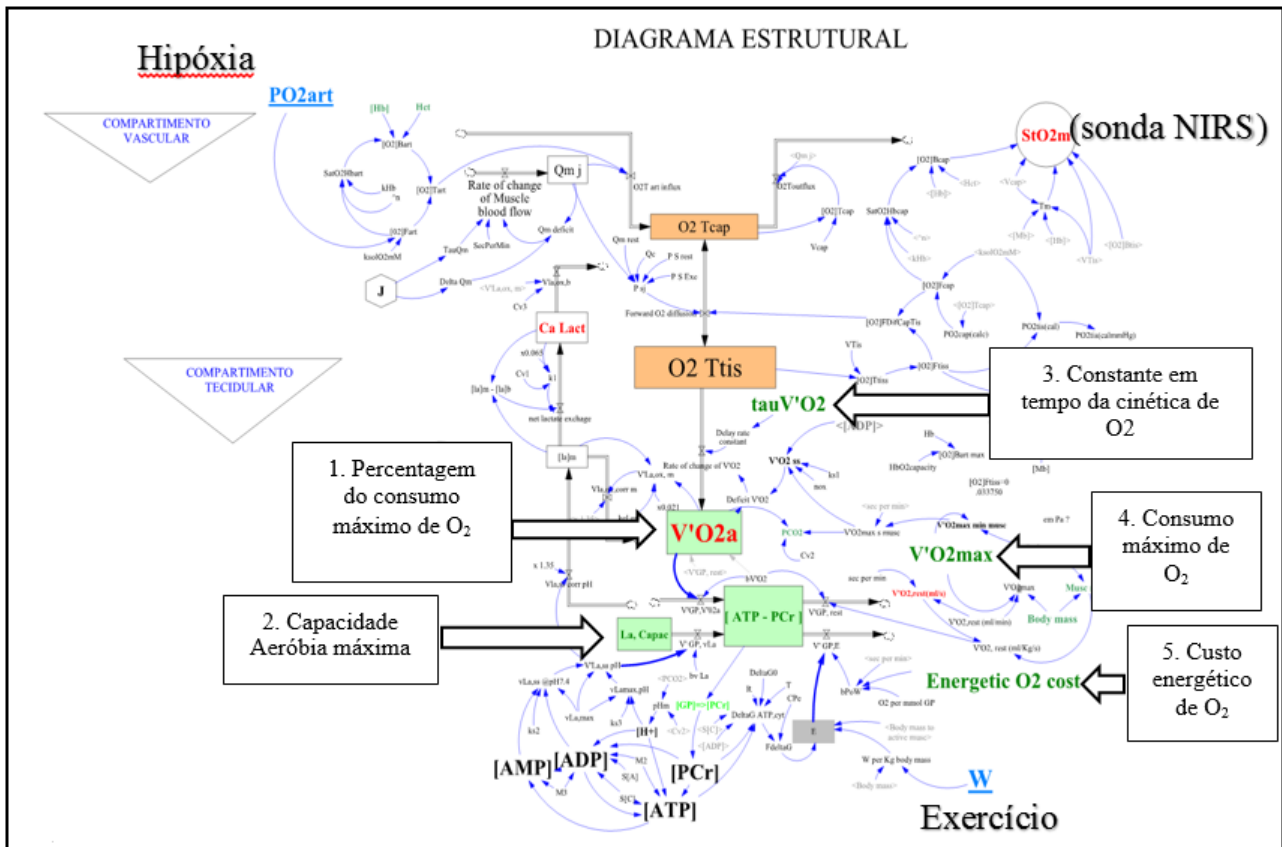
Os resultados evidenciam um pequeno efeito sobre o comportamento do  $V'O_{2a}$ , (Coeficiente de variação (CV) de 1.6%) e um efeito significativo no comportamento da Ca Lact (CV de 22.2%)

A amplitude de variação da Ca Lact entre 2.6 e 6.0 mmol /l, correspondente ao segundo período de 6 min de exercício, é relevante porque abrange diferentes domínios de intensidade. Assim, fica demonstrado que uma carga de treino idêntica pode corresponder a repercussões metabólicas e efeitos de treino completamente diferentes. Estas informações são importantes para o treinador.

O modelo permite explorar o efeito de múltiplos fatores determinantes do rendimento desportivo (Reis, Alves, Bruno, Vleck, & Millet, 2012). Na Figura 5. são evidenciados alguns desses fatores no diagrama estrutural do modelo fisiológico



**Figura 5:** Localização no diagrama estrutural de fatores energéticos determinantes no desempenho



A figura ilustra, a título exemplificativo, onde se localizam no diagrama estrutural do modelo fisiológico as variáveis endógenas (1. %  $\dot{V}O_2$  máximo e 2. Capacidade anaeróbia) e os parâmetros (3. Da cinética de  $O_2$ , 4. Consumo máximo de  $O_2$  e 5. Custo energético do  $O_2$ ) considerados por di Prompero como os fatores energéticos determinantes para estimar o desempenho.

Na figura estão destacados as variáveis exógenas do modelo (“W” e “PO2art”) usadas para condicionar o comportamento do modelo fisiológico em exercício e altitude.

## CONCLUSÕES

O modelo fisiológico é útil para integrar dados das avaliações laboratoriais, criar perfis de atletas, estimar a potência e capacidade dos sistemas anaeróbios e simular a resposta a diferentes intervenções (por ex. altitude, treino intervalado).

O modelo agora desenvolvido reúne as condições técnicas para ser aplicado na avaliação e controlo de treino e ser submetido a um processo de melhoria contínua.

## BIBLIOGRAFIA

1. Beard, D. A., Bassingthwaite, J. B., & Greene, A. S. (2005). Computational modeling of physiological systems. *Physiol Genomics*, 23, 1–3; discussion 4. doi:10.1152/physiolgenomics.00117.2005
2. Hunter, P. J., & Borg, T. K. (2003). Integration from proteins to organs: the physiome project. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 4, 237–243. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/nrm1017>
3. Lai, N., Camesasca, M., Saidel, G. M., Dash, R. K., & Cabrera, M. E. (2007). Linking pulmonary oxygen uptake, muscle oxygen utilization and cellular metabolism during exercise. *Ann Biomed Eng*, 35, 956–969. doi:10.1007/s10439-007-9271-4
4. Lai, N., Dash, R. K., Nasca, M. M., Saidel, G. M., & Cabrera, M. E. (2006). Relating pulmonary oxygen uptake to muscle oxygen consumption at exercise onset: in vivo and in silico studies. *European Journal of Applied Physiology*, 97, 380–394. doi:10.1007/s00421-006-0176-y
5. Mader, A. (2003). Glycolysis and oxidative phosphorylation as a function of cytosolic phosphorylation state and power output of the muscle cell. *Eur J Appl Physiol*, 88, 317–338. doi:10.1007/s00421-002-0676-3
6. Reis, J. F., Alves, F. B., Bruno, P. M., Vleck, V., & Millet, G. P. (2012). Oxygen uptake kinetics and middle distance swimming performance. *J Sci Med Sport*, 15, 58–63. doi:S1440-2440(11)00112-5 [pii] 10.1016/j.jsams.2011.05.012

