

# Fisiopatologia del trasporto dell'ossigeno: la metafora della “Funivia delle Mele”

Giacomo Bellani<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Centro Interdipartimentale di Scienze Mediche CISMed, Università di Trento, Trento - Italy

<sup>2</sup>Dipartimento di Anestesia e Rianimazione, Ospedale Santa Chiara, ASUIT Trento, Trento - Italy

## Physiopathology of oxygen transport: the “Apple Ropeway” metaphor

Oxygen balance is fundamental for human life, requiring a delicate equilibrium between oxygen delivery ( $DO_2$ ) and consumption ( $VO_2$ ). These physiological principles are critical for bedside clinicians, and they are often perceived as complex. This article introduces a novel educational metaphor, the “Apple Ropeway”, inspired by a real-world system in Trentino, Italy, to describe oxygen transport and extraction in lay terms. In this model, the circulation acts as a ropeway, the heart serves as the engine, hemoglobin molecules are the cabins, and oxygen molecules are the apples being transported from the loading station (lungs) to the market (tissues). The system illustrates how  $DO_2$  depends on cardiac output, hemoglobin concentration, and arterial saturation. The metaphor effectively reflects human physiology under various conditions, including physical exercise, chronic hypoxaemia, anemia, and shock. Furthermore, it clarifies complex scenarios like carbon monoxide poisoning and metformin intoxication, where oxygen binding or tissue consumption are impaired. Despite necessary simplifications (e.g., local heterogeneity is not taken into account), the apple ropeway metaphor provides an intuitive framework. By translating clinical variables into mechanical counterparts, this approach aims to help younger clinicians understand the crucial principles of oxygen transportation monitoring.

**Keywords:** Hemoglobin, Medical education, Oxygen consumption, Oxygen delivery, Shock

L'ossigeno è una molecola fondamentale per la vita umana, poiché consente la produzione di energia nelle cellule attraverso reazioni aerobiche. L'ossigeno viene trasferito dall'atmosfera al sangue attraverso i polmoni e poi trasportato dal circolo sanguigno ai tessuti (trasporto di ossigeno:  $DO_2$ ) che consumano una determinata quantità di ossigeno ( $VO_2$ ). L'equilibrio tra  $DO_2$  e  $VO_2$  è un elemento cruciale dell'omeostasi e si riflette nella frazione di ossigeno trasportato che i tessuti consumano ( $ERO_2 = VO_2/DO_2$ ) (1). In condizioni fisiologiche, sono in atto diversi meccanismi affinché qualsiasi variazione di  $VO_2$  (per esempio, un aumento durante l'esercizio fisico) si rifletta in variazioni simultanee del  $DO_2$ . Diverse condizioni patologiche, che colpiscono principalmente il sistema respiratorio e cardiovascolare, possono portare a una riduzione del  $DO_2$ , con conseguente aumento di  $ERO_2$ .  $DO_2$  dipende da un numero limitato di variabili ed  $ERO_2$  può essere facilmente dedotta misurando la saturazione venosa centrale di ossigeno: la loro corretta comprensione può essere molto informativa al letto del paziente (2,3).

Anche se a volte questo è considerato un argomento complesso, la fisiologia alla base è piuttosto semplice. Sono state utilizzate diverse metafore (per esempio, treni, conto bancario) per descrivere i principi del sistema e le interpretazioni delle diverse variabili raccolte.

Recentemente, sono stato ispirato dall'inaugurazione della “Funivia delle Mele” in Trentino (4) e ho trovato che questo fosse un ottimo modello per descrivere, in termini semplici, il normale funzionamento del sistema  $DO_2/VO_2$  e le sue modifiche in diverse condizioni fisiologiche e patologiche.

La traduzione del modello  $DO_2/VO_2$  nella metafora della funivia delle mele implica alcune semplificazioni, principalmente che: 1. il modello considera solo  $DO_2$  e  $VO_2$  globali senza tenere conto dell'eterogeneità locale, che può essere estremamente rilevante soprattutto nello shock maldistributivo (5); 2. la forma della curva di dissociazione dell'emoglobina e la quantità di l'ossigeno disciolto sono trascurati; 3. l'ossigeno di per sé non è una fonte di energia (al contrario delle mele).

**Received:** March 3, 2026

**Accepted:** March 10, 2026

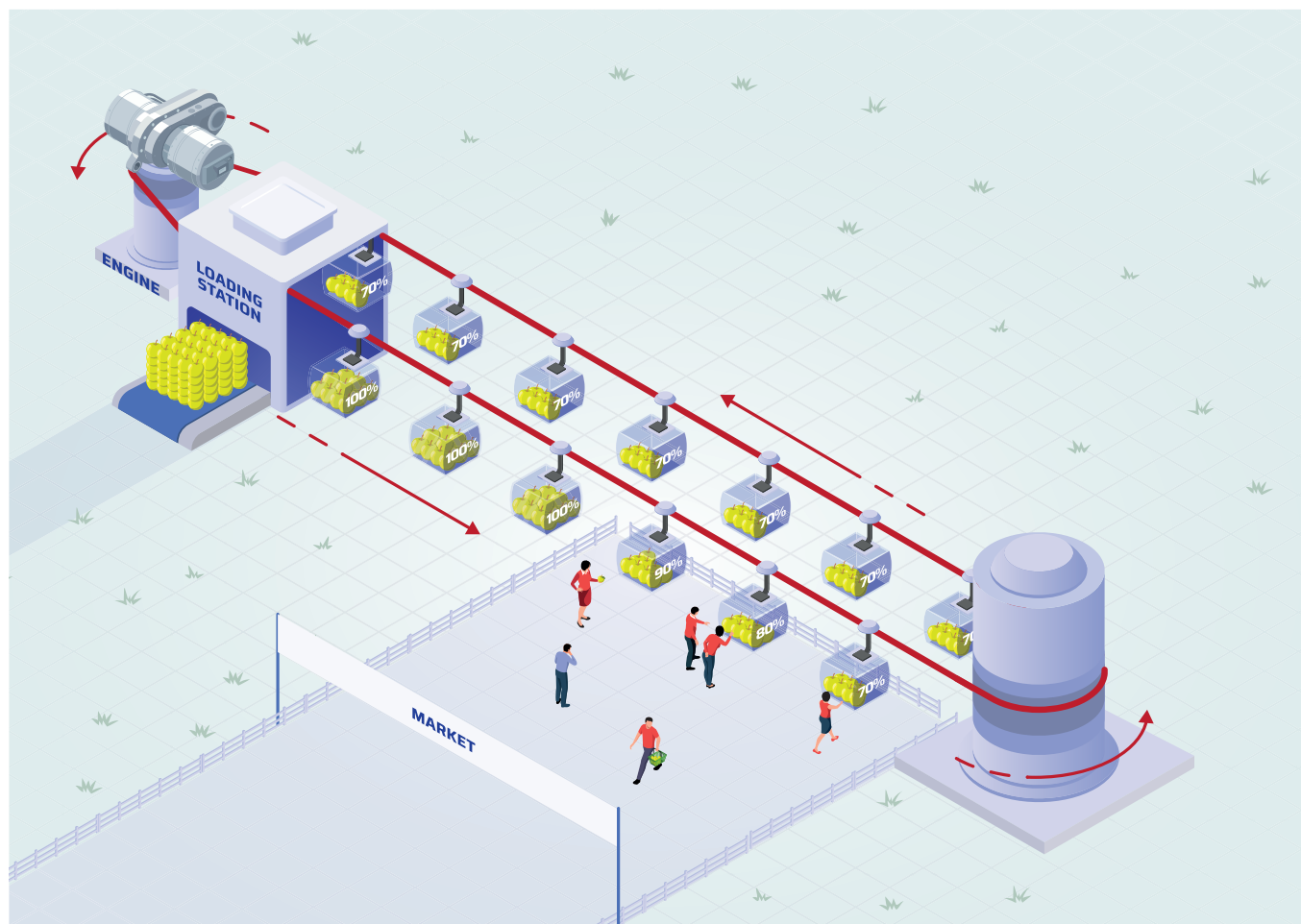
**Published online:** April 16, 2026

**Indirizzo per la corrispondenza:**

Giacomo Bellani

email: [giacomo.bellani@asuit.tn.it](mailto:giacomo.bellani@asuit.tn.it)





**FIGURA 1** - Descrizione del sistema.

Fisiologia umana reale	Metafora della funivia delle mele
<b>Descrizione del sistema (Fig. 1)</b>	
<p>L'ossigeno viene trasportato dai polmoni ai tessuti periferici attraverso la circolazione: il sangue circola tra il mediastino e i tessuti, spinto dalla pompa cardiaca. L'ossigeno viene trasportato dall'emoglobina, che ha una determinata concentrazione nel sangue, ed ogni grammo di emoglobina può trasportare una determinata quantità di ossigeno. Quindi <math>DO_2</math> è il prodotto del flusso sanguigno (gittata cardiaca, <math>CO</math>, concentrazione di emoglobina [Hb], sua capacità di trasferire ossigeno [1,39 mL/gr]) e della saturazione dell'emoglobina nel sangue arterioso (<math>Sat_{art}</math>).</p> $DO_2 = CO * 1,39 * [Hb] * Sat_{art}$	<p>Le mele (ossigeno) vengono trasportate dalla stazione di carico (polmoni) al mercato (tessuti) tramite una funivia (circolazione): una fune (sangue) circola tra i due estremi, trainata da un motore (cuore). Le mele vengono trasportate sulla funivia in cabine (emoglobina), che hanno una distanza prestabilita sulla fune e ciascuna cabina può allocare una determinata quantità di mele. Pertanto, la quantità totale di mele che può essere trasportata dal carico al mercato (<math>DO_2</math>) dipende da tre fattori: la frequenza delle cabine della fune (concentrazione di emoglobina), il carico di mele in ciascuna cabina (saturazione di emoglobina) e la velocità della fune (gittata cardiaca). Nella funivia reale, una cabina a pieno carico trasporta circa 300 kg di mele e le cabine viaggiano a una velocità di 5 m/s per una capacità di trasporto totale di 150 tonnellate/ora.</p>
<p>Il sangue viene pompato dal cuore verso i tessuti periferici (dove l'emoglobina rilascia ossigeno) attraverso i vasi arteriosi e ritorna al cuore attraverso i vasi venosi.</p>	<p>La fune viene trainata da un motore (cuore) all'interno della stazione di carico. La fune ha quindi un capo in uscita (vasi arteriosi), raggiunge la stazione di scarico (tessuti periferici) e un capo in entrata (vasi venosi).</p>
<p>I polmoni sono molto efficienti nell'ossigenare il sangue e l'emoglobina si satura quasi completamente di ossigeno (<math>Sat_{art}</math> 97-98%).</p>	<p>Nella stazione di carico il sistema è molto efficiente, cosicché ogni cabina che passa attraverso la stazione ha tempo sufficiente per essere caricata quasi completamente - al 97-98% - della capacità di carico (saturazione arteriosa) e poi ripartire. Per caricare ogni cabina, le mele vengono impilate e la altezza delle pile (pressione parziale dell'ossigeno) determina il riempimento di ogni cabina.</p>

(Continua)



(Continua)

In condizioni normali, i tessuti assorbono circa il 30% dell’ossigeno trasportato dalla circolazione sanguigna per soddisfare il fabbisogno del metabolismo cellulare.

A differenza di quanto accade nella vera “funivia delle mele”, immaginiamo che, nella stazione di scarico, ci siano alcuni clienti che consumano una determinata quantità di mele ( $VO_2$ ) raccogliendole dalle cabine e mangiandole. Normalmente mangiano circa il 30% delle mele che arrivano al mercato.

Pertanto, l’emoglobina che ritorna dai tessuti al cuore destro è saturata al 70% circa (saturazione venosa centrale mista,  $ScvO_2$ ). Questo valore è di fondamentale importanza per comprendere l’ $ERO_2$  dei tessuti. Una  $ScvO_2$  del 70% indica che, in media, il  $DO_2$  è adeguato al consumo di ossigeno ( $VO_2$ ). Se la  $ScvO_2$  diminuisce, ciò indica che il  $DO_2$  è diminuito o che il  $VO_2$  è aumentato o entrambe le cose.

Pertanto, le cabine tornano alla stazione di carico con un riempimento del 70% (saturazione venosa mista dell’emoglobina,  $ScvO_2$ ). Dal momento che l’azienda vuole accertarsi che ci siano sempre abbastanza mele per i clienti, la quantità di mele che rientrano alla stazione di carico è un parametro di fondamentale importanza. Una cabina che ritorna con un carico del 70% indica che le mele consegnate erano più che sufficienti per soddisfare le esigenze dei clienti. Se il carico di ritorno diminuisce, ciò indica che la consegna è diminuita, che il consumo è aumentato o entrambi.

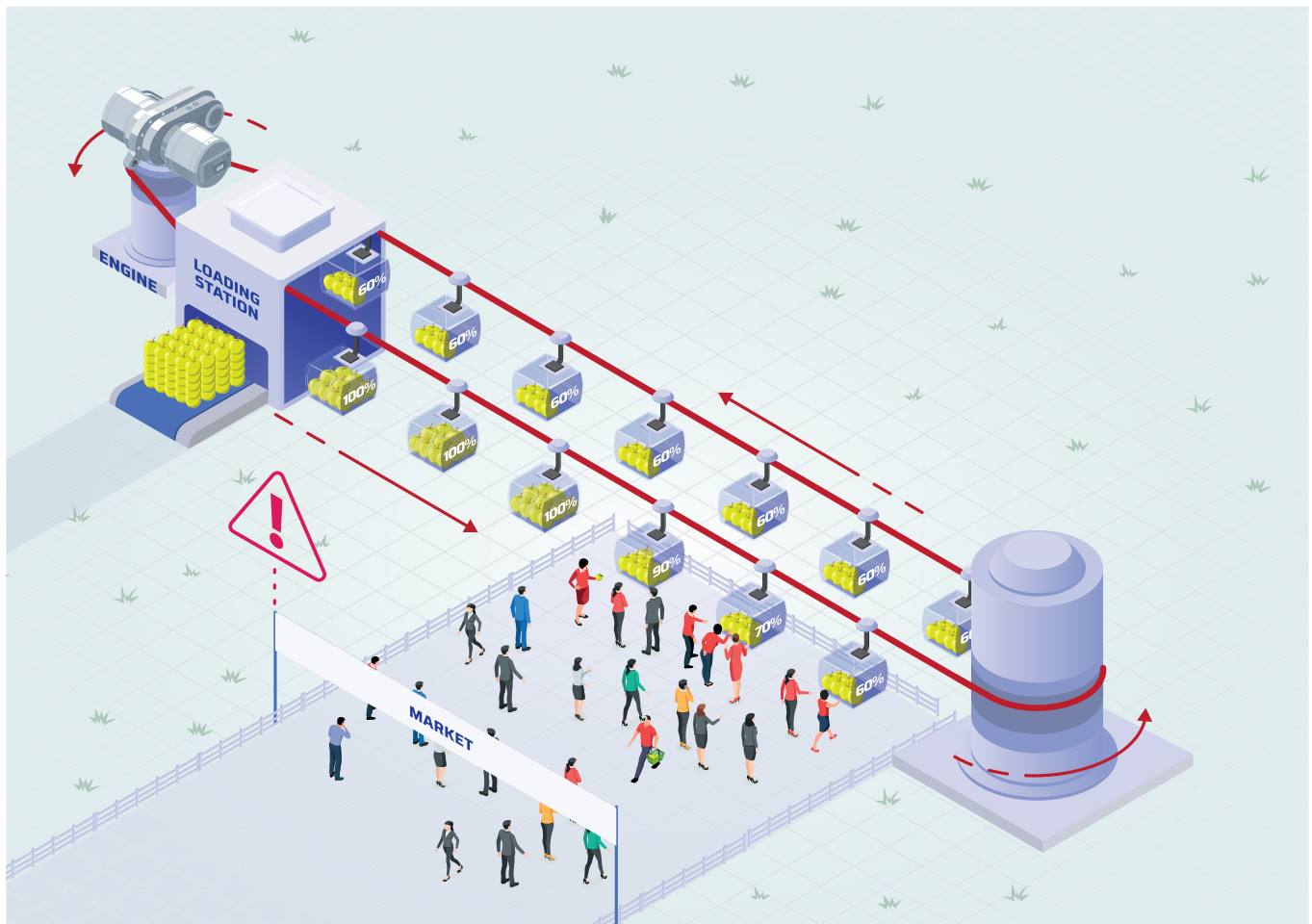


FIGURA 2 - Aumento della richiesta (cioè aumento del consumo di ossigeno nei tessuti).

**Fisiologia umana reale**

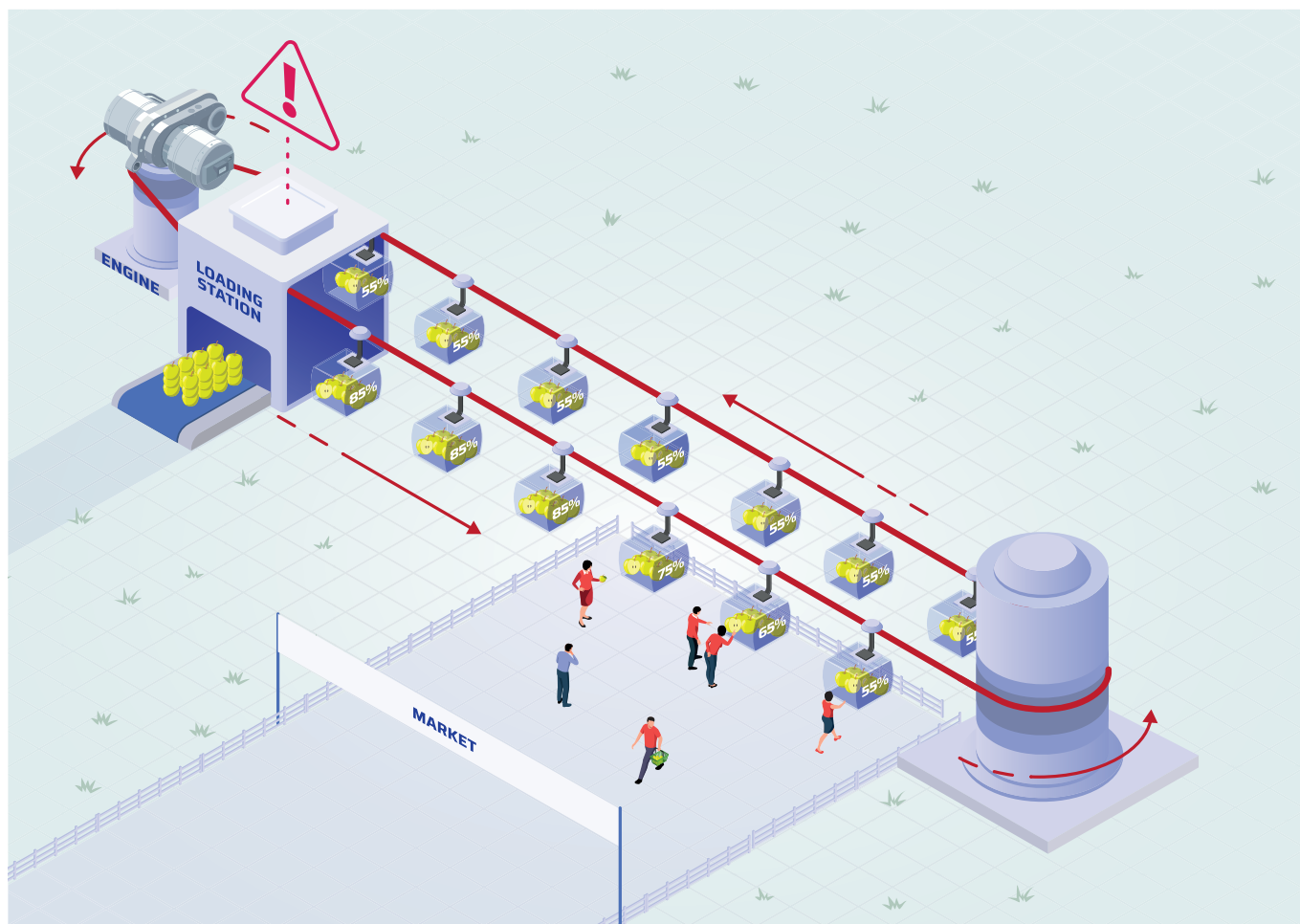
**Metafora della funivia delle mele**

**Esercizio fisico (Fig. 2)**

Durante l’esercizio fisico il consumo di ossigeno aumenta, quindi il ritorno venoso misto diminuisce. In risposta a ciò, la gittata cardiaca aumenta in modo da aumentare la perfusione dei tessuti e da mantenere stabile la  $ScvO_2$ , intorno al 70%.

A un certo punto la domanda dei clienti aumenta. Mangiano più mele mentre la cabina attraversa il mercato: le cabine tornerebbero alla stazione di carico riempite al 50-60% della loro capacità di carico. In risposta, il centro di controllo aumenterà la potenza del motore e quindi la velocità della fune (gittata cardiaca) in modo che più cabine vengano inviate alla periferia in un dato periodo di tempo. Di conseguenza, le cabine di ritorno saranno riempite, ancora una volta con il 70% della loro capacità di carico.





**FIGURA 3** - Ridotta saturazione arteriosa.

#### Fisiologia umana reale

##### Ipossimia arteriosa (Fig. 3)

In alcune circostanze, la pressione parziale dell'ossigeno nei capillari diminuisce, con conseguente riduzione della saturazione dell'emoglobina. Per mantenere costante il  $DO_2$  è possibile aumentare rapidamente la gittata cardiaca, ma questa soluzione è inefficace nel lungo termine.

Pertanto, quando l'ipossimia è cronica (per esempio, esposizione ad altitudini elevate, BPCO), la concentrazione di emoglobina aumenta (6).

##### Limitazione della diffusione

La diffusione dell'ossigeno dallo spazio alveolare al sangue è compromessa, per cui il tempo di transito capillare potrebbe non consentire una completa saturazione dell'emoglobina.

#### Metafora della funivia delle mele

In alcune circostanze, l'altezza della pila di mele non può essere aumentata oltre un determinato valore a causa del malfunzionamento del sistema di carico: per mantenere costante la consegna delle mele in condizioni di acuzie, è possibile aumentare temporaneamente la velocità della fune, ma ciò è inefficiente nel lungo termine.

Pertanto, quando ciò si verifica per un periodo di tempo prolungato (condizioni croniche), è più efficiente aumentare il numero di cabine lungo il cavo (policitemia).

Il sistema di carico delle mele sulle cabine diventa meno efficiente e così il tempo di transito nella stazione di carico è insufficiente per consentire un carico completo delle cabine: queste partono verso la periferia parzialmente scariche.

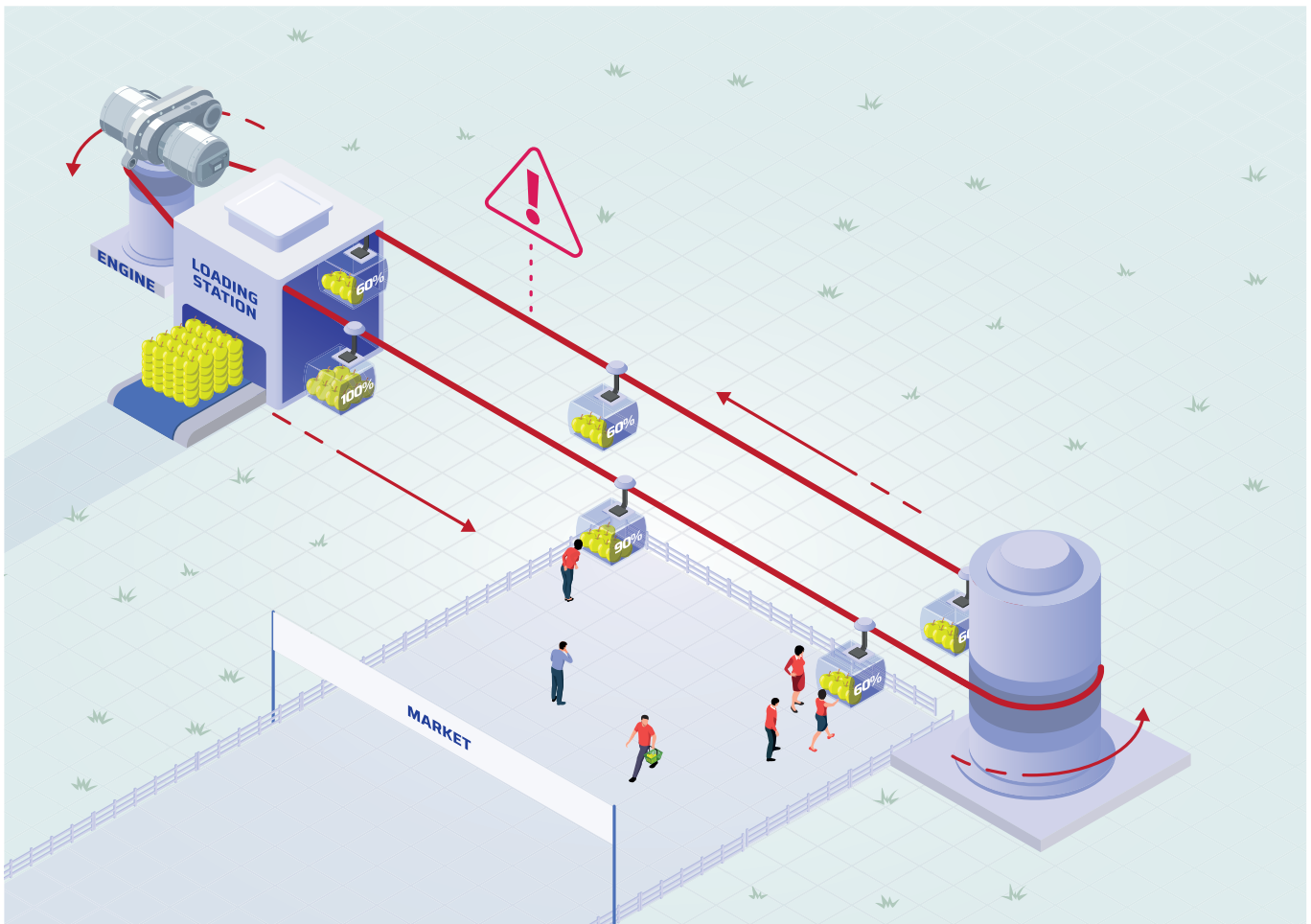


FIGURA 4 - Minor numero di cabine.

Fisiologia umana reale	Metafora della funivia delle mele
<b>Anemia (Fig. 4)</b>	Per una serie di motivi, il numero di cabine è diminuito e, in circostanze normali, il numero di mele che arriva al negozio è ridotto. I clienti consumano gran parte delle mele presenti nelle cabine, che tornano alla stazione di carico con un carico molto ridotto. È necessario aumentare la velocità della fune per compensare questa situazione.
<b>Intossicazione da monossido di carbonio</b>	Un concorrente sleale ha riempito la maggior parte delle cabine con mele marce. Non c'è spazio per le mele buone: i clienti soffriranno per la mancanza di mele buone, ma allo stesso tempo non c'è modo di togliere le mele marce dalle cabine.
<b>Intossicazione da metformina</b>	I clienti sul mercato non riescono quasi a raggiungere le mele e a mangiarle. Di conseguenza, soffrono per la fame, ma le cabine che tornano alla stazione principale sono quasi piene (90%).

(Continua)



(Continua)

Fisiologia umana reale	Metafora della funivia delle mele
<b>Shock</b>	
<p>Il sistema circolatorio è compromesso a causa di un'insufficienza cardiaca (shock cardiogeno) o di una perdita di tono vascolare (shock maldistributivo) (8). La concentrazione e la saturazione dell'emoglobina possono essere normali, ma la gittata cardiaca è ridotta; quindi, il DO<sub>2</sub> diminuisce diventando adeguato rispetto al consumo dei tessuti, che possono diventare ipossiemici. È necessario che i vasi riacquistino tono e/o che la funzione cardiaca sia migliorata!</p>	<p>Il sistema che muove la fune diventa inefficiente: il motore perde potenza e/o la fune perde tensione. Il numero di cabine lungo la fune e la loro capacità di trasportare mele sono gli stessi, ma la fune funziona più lentamente; quindi, la consegna delle mele al negozio diminuisce e alcuni clienti potrebbero non avere abbastanza mele da mangiare. La fune deve essere tesa e/o il motore riparato!</p>

In sintesi, forniamo una descrizione viva in “termini semplici” (ma non semplicistici!) dei principi che regolano il trasporto dell'ossigeno da e verso i tessuti periferici, l'estrazione e il monitoraggio di questi processi. Nonostante alcune semplificazioni, la metafora della funivia delle mele rispecchia in modo abbastanza accurato questo processo (e si potrebbero citare anche altri esempi) e speriamo che possa aiutare i medici più giovani ad avvicinarsi a questo argomento affascinante e cruciale.

## Disclosures

**Conflitto di interessi:** l'autore dichiara di non avere conflitti di interessi.

**Finanziamenti:** l'autore dichiara che questo lavoro non ha ricevuto finanziamenti specifici da qualsiasi ente nei settori pubblico, privato o senza fini di lucro.

## Bibliografia

1. Tánčzos K, Molnár Z. The oxygen supply-demand balance: a monitoring challenge. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol.* 2013; 27(2):201-207. [CrossRef PubMed](#)
2. Huang YCT. Monitoring Oxygen Delivery in the Critically Ill. *Chest.* 2005;128(5):554S-560S. [CrossRef](#)
3. Mayer K, Trzeciak S, Puri NK. Assessment of the adequacy of oxygen delivery. *Curr Opin Crit Care.* 2016;22(5):437-443. [CrossRef PubMed](#)
4. Melinda. Funivia delle Mele. [Online](#) (Accessed March 2026)
5. Ince C, Mik EG. Microcirculatory and mitochondrial hypoxia in sepsis, shock, and resuscitation. *J Appl Physiol.* 2016;120(2): 226-235. [CrossRef PubMed](#)
6. Gassmann M, Mairböurl H, Livshits L, et al. The increase in hemoglobin concentration with altitude varies among human populations. *Ann N Y Acad Sci.* 2019;1450(1):204-220. [CrossRef PubMed](#)
7. Protti A, Russo R, Tagliabue P, et al. Oxygen consumption is depressed in patients with lactic acidosis due to biguanide intoxication. *Crit Care.* 2010;14(1):R22. [CrossRef PubMed](#)
8. Vincent JL, De Backer D. Circulatory Shock. Finfer SR, Vincent JL, editors. *N Engl J Med.* 2013;369(18):1726-1734. [CrossRef](#)

