

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA SOBRE TRILHOS: O POTENCIAL DA FRENAGEM REGENERATIVA NA DESCIDA DA SERRA DOS CARAJÁS

*Luiz Carlos Gabriel

1. Introdução

A operação ferroviária de carga pesada (heavy haul) na Estrada de Ferro Carajás (EFC), representa um dos cenários mais exigentes da engenharia ferroviária. O transporte de minério de ferro em composições de alta capacidade exige um gerenciamento dinâmico rigoroso, especialmente durante a transposição de declives acentuados, como a descida da Serra dos Carajás. Tradicionalmente, a energia cinética e potencial excedente dessas massas colossais era integralmente dissipada em forma de calor nos bancos de resistores (frenagem reostática) ou por atrito mecânico nas sapatas de freio, gerando desgaste prematuro de componentes e desperdício energético.

Com a consolidação dos sistemas de tração por corrente alternada (AC) e inversores de frequência modernos, a frenagem regenerativa converteu-se em uma tecnologia mandatória. Este artigo analisa os fundamentos físicos, a modelagem matemática aplicada a um cenário prático e os mecanismos elétricos que transformam locomotivas em usinas geradoras móveis, mitigando emissões de carbono e otimizando custos operacionais.

2. Fundamentos da Física e Dinâmica Ferroviária com Exemplo Numérico

O princípio da conservação da energia rege que a energia potencial acumulada no topo do gradiente deve ser dissipada ou convertida para que o trem mantenha uma velocidade de descida segura e constante.

A. Energia Potencial Gravitacional (E_p)

$$E_p = m \times g \times h$$

Onde:

- **m**: massa total da composição (kg)
- **g**: aceleração da gravidade ($\sim 9,81 \text{ m/s}^2$)
- **h**: desnível vertical da descida (m)

B. Energia Cinética (E_c) e Momento de Inércia (I)

$$E_c = (1/2) \times m \times v^2 + \sum [(1/2) \times I \times \omega^2]$$

Onde I é o momento de inércia dos eixos e rodas, e ω é a velocidade angular. O momento de inércia atua resistindo às variações de velocidade rotacional. Na descida, a gravidade tende a incrementar a velocidade linear (v) e angular (ω). Para manter a velocidade constante, o torque de frenagem elétrica deve contrapor-se a essa tendência, absorvendo a energia de translação e rotação.

C. Exemplo Numérico Prático (Cenário Realístico Carajás)

Considere uma composição típica de minério de ferro com as seguintes características:

- **Massa total (m):** 44.000 toneladas = 44.000.000 kg (aproximadamente 330 vagões + locomotivas)
- **Desnível vertical (h):** 300 metros
- **Velocidade de descida constante (v):** 45 km/h = 12,5 m/s
- **Eficiência global de regeneração (η):** 85% (incluindo perdas mecânicas, elétricas e do inversor)

Cálculo da Energia Potencial Disponível:

$$E_p = 44.000.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 300 \text{ m}$$

$$E_p = 129.492.000.000 \text{ Joules} = 129,49 \text{ GJ}$$

Convertendo para Megawatt-hora (MWh): $129,49 \text{ GJ} / 3600 \approx 35,97 \text{ MWh}$

Considerando a eficiência do sistema ($\eta = 85\%$), a energia líquida efetivamente recuperada e aproveitada pelo sistema elétrico é: **30,57 MWh por descida.**

3. O Motor de Tração como Gerador e Aspectos Avançados de Controle

A reversão do fluxo energético fundamenta-se nas propriedades eletromagnéticas dos motores de tração assíncronos (indução AC). No modo de tração, o inversor eletrônico alimenta o estator com uma frequência superior à velocidade de rotação do rotor, gerando torque positivo.

Ao iniciar a descida, o sistema de controle da locomotiva altera o regime de operação através de inversores de quatro quadrantes (4Q). A frequência do estator é reduzida para um valor inferior à velocidade mecânica real do rotor (escorregamento negativo). Consequentemente, o torque inverte seu sentido, atuando como uma força de frenagem mecânica sobre os eixos. O estator passa a coletar a força eletromotriz induzida, operando como gerador.

Gerenciamento de Energia Avançado: Toda a energia gerada em corrente alternada é retificada para o barramento de corrente contínua (Link DC) das locomotivas. Através de sistemas modernos de armazenamento de energia a bordo (ESS - Energy Storage Systems), como bancos de baterias de alta densidade ou supercapacitores, a energia pode ser armazenada localmente se a rede de alimentação não estiver receptiva, evitando a queima desnecessária nos reostatos térmicos.

4. Dashboard de Monitoramento Operacional (Valores Práticos)

Indicador Operacional (KPI)	Parâmetro de Leitura	Unidade	Valor Instantâneo / Acumulado
Massa Bruta Controlada	Peso total medido via balança dinâmica	t	44.000
Velocidade Operacional	Velocidade regulada para descida sob freio dinâmico	km/h	45,0

Potência Regenerativa Instantânea	Potência elétrica sendo injetada no Link DC	MW	18,5
Energia Líquida Recuperada	Total acumulado integrado ao longo do trecho de descida	MWh	30,57
Eficiência do Sistema (Inércia + Elétrica)	Rendimento da conversão eletromecânica dos eixos	%	85,0%
Compensação de Carbono (ESG)	Massa de CO2 evitada por substituição de queima térmica	t CO2eq	24,4

5. Conclusão

O aproveitamento da energia regenerativa na descida da Serra dos Carajás consolida-se como uma aplicação de alta sofisticação da engenharia elétrica e ferroviária. A transformação da energia potencial gravitacional em eletricidade útil demonstra que as restrições geográficas da via podem ser convertidas em vetores de eficiência e sustentabilidade econômica, posicionando o heavy haul nacional na vanguarda da descarbonização logística.

***Luiz Carlos Gabriel**

M.Sc - Engenheiro Eletricista, Engenheiro Ferroviário
 Conselheiro da Aenfer

AENFER TECHNICAL NOTE No.02 – JULY 2026

ENERGY EFFICIENCY ON RAILS: THE POTENTIAL OF REGENERATIVE BRAKING ON THE DESCENT OF THE SERRA DOS CARAJÁS

***Luiz Carlos Gabriel**

1. Introduction

Heavy-haul rail operation on the Carajás Railroad (EFC) represents one of the most demanding scenarios in global railway engineering. The transport of iron ore in high-capacity compositions requires rigorous dynamic management, especially during the transposing of steep slopes, such as the descent of the Serra dos Carajás. Traditionally, the excess kinetic and potential energy of these colossal masses was entirely dissipated as heat in

resistor banks (rheostatic braking) or by mechanical friction on the brake shoes, generating premature wear of components and energy waste.

With the consolidation of alternating current (AC) traction systems and modern frequency inverters, regenerative braking has become a mandatory technology. This paper analyzes the physical fundamentals, the mathematical modeling applied to a practical scenario, and the electrical mechanisms that transform locomotives into mobile power plants, mitigating carbon emissions and optimizing operational costs.

2. Fundamentals of Physics and Railway Dynamics with Numerical Example

The principle of conservation of energy dictates that the potential energy accumulated at the top of the gradient must be dissipated or converted for the train to maintain a safe and constant descent speed.

A. Gravitational Potential Energy (E_p)

$$E_p = m \times g \times h$$

Where:

- **m**: total mass of the composition (kg)
- **g**: acceleration of gravity ($\sim 9.81 \text{ m/s}^2$)
- **h**: vertical descent offset (m)

B. Kinetic Energy (E_c) and Moment of Inertia (I)

$$E_c = (1/2) \times m \times v^2 + \sum [(1/2) \times I \times \omega^2]$$

Where I is the moment of inertia of the axles and wheels, and ω is the angular velocity. The moment of inertia acts by resisting variations in rotational speed. On the descent, gravity tends to increase both linear (v) and angular (ω) velocities. To maintain a constant speed, the electrical braking torque must oppose this tendency, absorbing translation and rotation energy.

C. Practical Numerical Example (Realistic Carajás Scenario)

Consider a typical iron ore composition with the following characteristics:

- **Total mass (m)**: 44,000 tons = 44,000,000 kg (approximately 330 wagons + locomotives)
- **Vertical offset (h)**: 300 meters
- **Constant descent speed (v)**: 45 km/h = 12.5 m/s
- **Global regeneration efficiency (η)**: 85% (including mechanical, electrical, and inverter losses)

Calculation of Available Potential Energy:

$$E_p = 44,000,000 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 300 \text{ m}$$

$$E_p = 129,492,000,000 \text{ Joules} = 129.49 \text{ GJ}$$

Converting to Megawatt-hour (MWh): $129.49 \text{ GJ} / 3600 \approx 35.97 \text{ MWh}$

Considering the efficiency of the system ($\eta = 85\%$), the net energy effectively recovered and used by the electrical system is: **30.57 MWh per descent.**

3. The Traction Motor as a Generator and Advanced Control Aspects

The reversal of the energy flow is based on the electromagnetic properties of asynchronous traction motors (AC induction). In traction mode, the electronic inverter feeds the stator with a frequency higher than the rotational speed of the rotor, generating positive torque.

Upon initiating the descent, the locomotive's control system alters the operating regime using four-quadrant (4Q) inverters. The stator frequency is reduced to a value below the actual mechanical speed of the rotor (negative slip). Consequently, the torque reverses its direction, acting as a mechanical braking force on the axles. The stator then collects the induced electromotive force, operating as a generator.

Advanced Energy Management: All energy generated in alternating current is rectified to the direct current bus (DC Link) of the locomotives. Through modern on-board energy storage systems (ESS), such as high-density battery banks or supercapacitors, energy can be stored locally if the supply network is not receptive, avoiding unnecessary burning in thermal rheostats.

4. Operational Monitoring Dashboard (Practical Values)

Operational Indicator (KPI)	Reading Parameter	Unit	Instantaneous / Accumulated Value
Gross Controlled Mass	Total weight measured via dynamic scale	t	44,000
Operational Speed	Regulated speed for descent under dynamic braking	km/h	45.0
Instantaneous Regenerative Power	Electrical power being injected into the DC Link	MW	18.5
Net Recovered Energy	Integrated accumulated total along the descent section	MWh	30.57
System Efficiency (Inertia + Electrical)	Electromechanical conversion efficiency of axles	%	85.0%
Carbon Offset (ESG)	CO2 mass avoided by thermal burn substitution	t CO2eq	24.4

5. Conclusion

The utilization of regenerative energy on the descent of the Serra dos Carajás consolidates itself as a highly sophisticated application of electrical and railway engineering. The transformation of gravitational potential energy into useful electricity demonstrates that the geographic restrictions of the track can be converted into vectors of efficiency and economic sustainability, positioning national heavy haul at the forefront of logistics decarbonization.

***Luiz Carlos Gabriel**

M.Sc - Electrical Engineer, Railway Engineer

Aenfer Board Member