

Frenagem Regenerativa na indústria: Um estudo de caso em Pontes Rolantes

Regenerative Braking in Industry: A Case Study in Cranes

DOI:10.34117/bjdv7n5-029

Recebimento dos originais: 04/04/2021

Aceitação para publicação: 04/05/2021

Luiz Guilherme Vianna Fracalossi

Graduando Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES

E-mail: luizguilhermevf@gmail.com

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

Doutor Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES

E-mail: walbermark@gmail.com

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo, através de modelagens e simulações, estudar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de Frenagem Regenerativa (FR) em movimentos de içamento de carga por Pontes Rolantes (PR) na indústria, buscando o aumento da Eficiência Energética (EE) e, conseqüentemente, redução de custos dos processos analisados. A pesquisa se baseou no levantamento de dados e informações necessárias para a implementação da modelagem de um sistema que simule o processo a ser estudado. Em posse do conhecimento necessário, implementou-se um sistema capaz de simular o acionamento de uma máquina elétrica, apropriado para realizar a Frenagem Regenerativa (FR) a ser estudada. Com a conclusão da modelagem, simulou-se o processo com parâmetros definidos de forma prévia, obtendo os valores do processo cruciais para uma análise econômica. Em posse dos valores de processo obtidos nas simulações, realizou-se, através de uma modelagem matemática, indicações básicas e necessárias para inferir sobre a viabilidade técnica e econômica da implementação

Palavras-chave: Frenagem Regenerativa, Içamento de Carga, Acionamento de Máquinas, Eficiência Energética, Ambiente Industrial

ABSTRACT

The present research aims, through modeling and simulations, to study the technical and economic feasibility of implementing a Regenerative Braking (RF) system in load hoisting movements by Overhead Cranes (OR) in industry, seeking to increase Energy Efficiency (EE) and, consequently, cost reduction of the analyzed processes. The research was based on the survey of data and information needed to implement the modeling of a system that simulates the process to be studied. In possession of the necessary knowledge, a system capable of simulating the drive of an electric machine was implemented, appropriate to perform the Regenerative Braking (RF) to be studied. With the modeling concluded, the process was simulated with previously defined parameters, obtaining the

crucial process values for an economic analysis. In possession of the process values obtained in the simulations, the basic and necessary indications to infer on the technical and economical viability of the implementation were performed through a mathematical modeling.

Keywords: Regenerative Braking, Load Hoist, Machine Drive, Energy Efficiency, Industrial Environment

1 INTRODUÇÃO

A produção industrial em massa é responsável por desencadear uma exploração excessiva de recursos naturais, trazendo degradação e desequilíbrio ambiental. Processos industriais mais eficientes energeticamente propiciam, além de retorno financeiro, um menor impacto ambiental. Nesse sentido, é crucial o desenvolvimento de soluções tecnológicas que visam a sustentabilidade do ambiente e também econômica (MAHAPATRA; PRADHAN, 2016; NETO, AMORA, PINTO, 2021).

A busca pela sustentabilidade ambiental e econômica na indústria é responsável por mudanças na filosofia de produção, processos mais energeticamente eficientes se tornam cada vez mais essenciais, porém, aumentam o grau de complexidade dos modelos implementados. Por consequência, é essencial que novas pesquisas sobre essas configurações e metodologias sejam realizadas, investigando melhor os impactos desse avanço tecnológico no meio ambiente e econômico (MAHAPATRA; PRADHAN, 2016; NETO, AMORA, PINTO, 2021).

No ambiente industrial, o exercício de içamento para transporte de cargas é fundamental, estando presente nos mais diversos seguimentos de produção. Dentre todos os equipamentos responsáveis por executar essa atividade, as PR apresentam grande representatividade no exercício dessa prática, tendo por característica a capacidade de içar cargas com elevada inércia. Devido à grande frequência de trabalho e às elevadas cargas que transportam, o consumo de energia elétrica dessas estruturas é significativo, sendo assim, importante obter técnicas para aproveitar melhor o processo energeticamente e elevar a sua EE (ZARRABIAN; AMANI; ELSAIAH, 2018; BELDJAJEV; LEHTLA; MOLDER, 2010).

Na área automotiva, sistemas regenerativos são integrados à frenagem de veículos elétricos e híbridos, devolvendo parcela da energia elétrica ao processo e, conseqüentemente, diminuindo emissões e aumentando a eficiência energética. Essa tecnologia já é bem difundida no ramo, tendo uma gama de pesquisas e resultados

concretizados, como mostram os estudos de Yoong e outros (2010), Zhang e outros (2015) e Heydari e outros (2019). Por mais promissora que seja, esta tecnologia não é muito difundida no ambiente industrial, sobretudo em processos dependentes de içamento de carga, contanto com um número limitado de pesquisas e estudos de modelos com a tecnologia da regeneração implementada (ADIB; DHAOUADI, 2017).

Por este motivo, esta pesquisa tem o objetivo estudar, através da modelagem e simulação utilizando o *software* MATLAB® e sua biblioteca SimPowerSystems™, a viabilidade técnica e econômica da implementação da tecnologia de FR em processos que contemplam içamento de carga na indústria, buscando uma alternativa que aumente a EE do sistema e, conseqüentemente, seja capaz de torna-lo mais sustentável (CHANDRANKANTA; MAHAPATRA; SAHOO, 2018).

2 METODOLOGIA, DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Através de pesquisas de campo na indústria e estudos de materiais científicos utilizados como texto base, realizou-se o levantamento de dados e informações essenciais para definir padrões e configurações necessárias para a realização da pesquisa em questão. Tendo posse dos dados levantados, definiu-se as características do processo e os parâmetros dos equipamentos elétricos presentes na PR a serem modelados. De posse de todos parâmetros essenciais, realizou-se a implementação de um sistema que possibilita a simulação do processo de interesse a ser estudado utilizando o *software* MATLAB® e sua biblioteca SimPowerSystems™.

Para a realização do estudo em questão, foi necessário obter e definir uma gama de informações cruciais para as etapas de modelagem e simulação. Estes dados foram coletados através de pesquisas de campo na indústria e matérias científicos utilizados como texto base para esta pesquisa. As primeiras definições do projeto foram as especificações das etapas do processo e condições do trabalho da PR. O processo de transporte de cargas na indústria segue os seguintes passos:

- Içamento da carga a ser transportada;
- Deslocamento horizontal da carga içada;
- Descida da carga transportada.

Para realização das etapas citadas, é necessário definir os parâmetros que regem o processo, sendo eles: Velocidade de movimentação da carga, altura do içamento e do deslocamento horizontal da carga e a frequência de trabalho do processo.

Quadro 1. Especificação das etapas do processo a ser estudado.

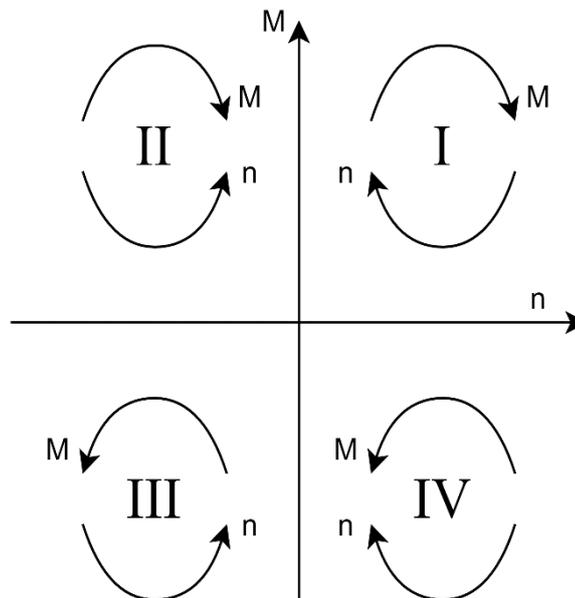
Altura de Içamento [m]	Velocidade do Movimento [m/s]	Frequência diária de Trabalho
20	2	120

Fonte: Produção do próprio autor.

Como evidenciado pela Quadro 1, definiu-se a altura de trabalho da PR, para içar e transportar as cargas, em 20 m. Como questão de segurança adotada nos transportes de cargas na indústria, limitou-se a velocidade de movimentação em 2 m/s, para isso, é empregado redutores de velocidade nas máquinas elétricas. Além desses fatores, também foi possível definir que a atividade seria realizada 120 vezes por dia, demonstrando a importância da atividade para a produção.

Em uma PR, a movimentação das cargas é realizada por máquinas elétricas com acionamento baseado em eletrônica de potência. Para a aplicação na indústria, cada eixo de deslocamento, vertical ou horizontal, contém seu próprio grupo de máquinas responsáveis pelo transporte.

Figura 1. Representação dos quadrantes de trabalho da máquina elétrica formados pelos sentidos do torque do motor (M) e a da rotação (n). Fonte: Adaptado de Beldjajev e outros (2010).



Como representado pela Figura 1, a máquina elétrica apresenta quatro quadrantes definidos de operação, sendo que em dois deles, primeiro e terceiro quadrantes trazidos pela Figura 1, quando o sentido do torque no eixo é oposto ao sentido de rotação, estará

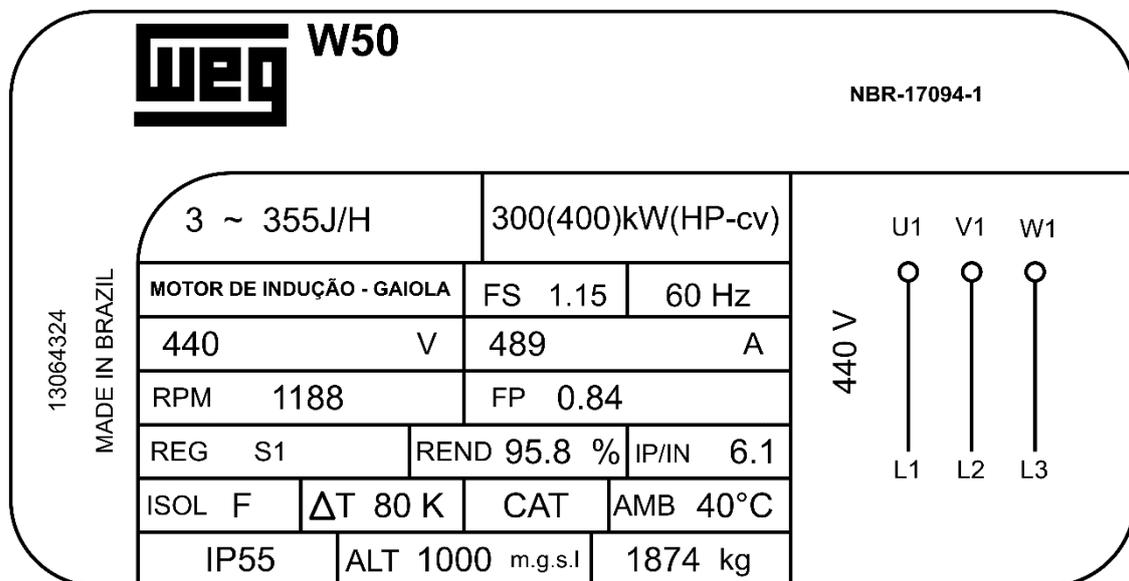
trabalhando como uma máquina geradora de energia elétrica. Desse modo, quando a carga está sendo descida, na etapa final do processo de transporte, os sentidos do torque da máquina e a rotação estão opostos, pois nesse movimento, a carga tende a disparar devido a aceleração da gravidade e a máquina elétrica, buscando a velocidade constante no movimento, deve se opor ao movimento e frear a carga (BELDJAJEV; LEHTLA; MOLDER, 2010).

Sendo assim, nesse projeto de pesquisa, para analisar a frenagem regenerativa, serão adotados tais critérios e analisados os aspectos a seguir:

- Para o estudo da FR, a PR será representada na modelagem por uma máquina elétrica e um sistema de acionamento baseado em eletrônica de potência, já que são nesses equipamentos que ocorre a recuperação da energia;
- Será analisado apenas o movimento de descida da carga, pois no movimento de transporte da carga, apenas nessa etapa temos a máquina trabalhando como geradora de energia.

Tendo definido as condições de trabalho e as etapas onde serão estudadas o processo de regeneração de energia, foi possível definir os parâmetros da máquina elétrica a ser modelada.

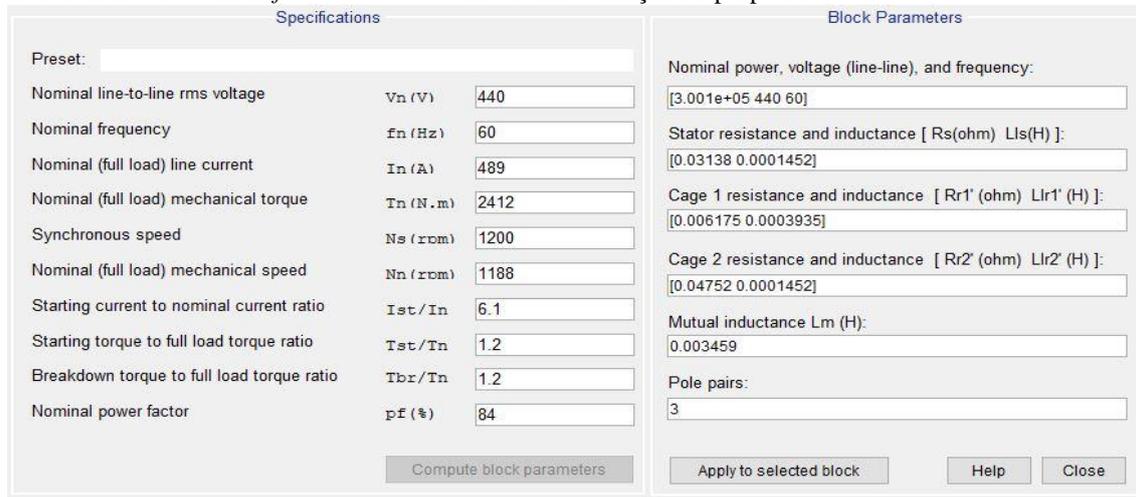
Figura 2. Placa de identificação principal da máquina elétrica escolhida para modelagem. Fonte: Adaptado de WEG (2021a).



Para seguir os padrões da indústria, foi escolhido um modelo de motor elétrico de um fabricante renomado e muito utilizado no ambiente industrial, este equipamento tem seus dados de placa, essenciais para modelagem, especificados pela Figura 2. Para esta

atividade, foi dimensionado uma máquina com capacidade considerável de trabalho, o que representa sua importância no processo de produção industrial.

Figura 3. Representação dos parâmetros da máquina elétrica no bloco *Asynchronous Machine SI Units* do ambiente Simulink do *software* MATLAB®. Fonte: Produção do próprio autor.

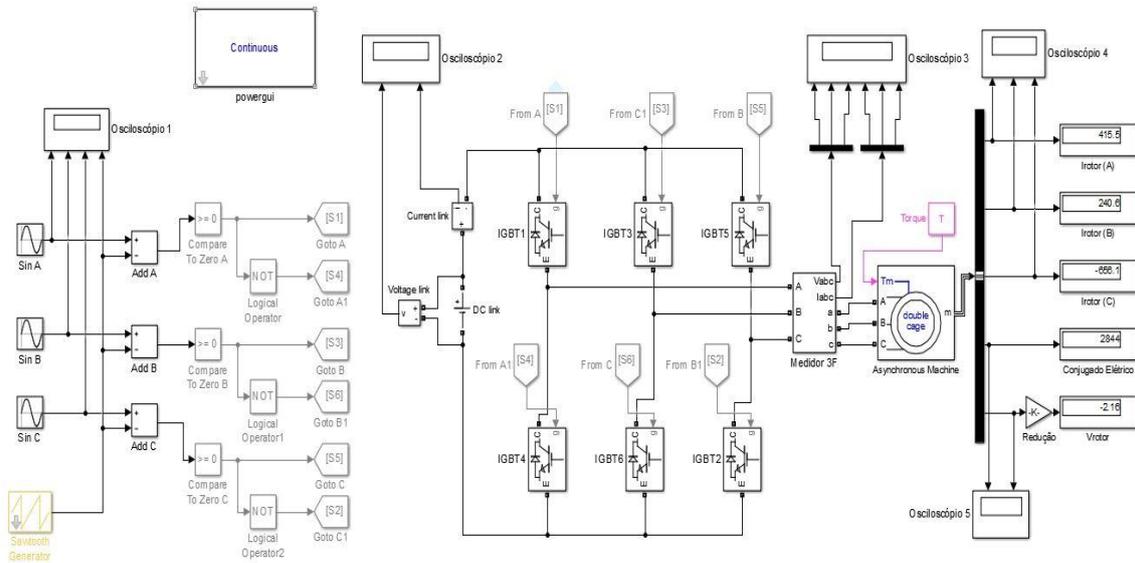


Specifications		Block Parameters	
Preset:		Nominal power, voltage (line-line), and frequency:	
Nominal line-to-line rms voltage	Vn (V) 440	[3.001e+05 440 60]	
Nominal frequency	fn (Hz) 60	Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:	
Nominal (full load) line current	In (A) 489	[0.03138 0.0001452]	
Nominal (full load) mechanical torque	Tn (N.m) 2412	Cage 1 resistance and inductance [Rr1' (ohm) Llr1' (H)]:	
Synchronous speed	Ns (rpm) 1200	[0.006175 0.0003935]	
Nominal (full load) mechanical speed	Nn (rpm) 1188	Cage 2 resistance and inductance [Rr2' (ohm) Llr2' (H)]:	
Starting current to nominal current ratio	Ist/In 6.1	[0.04752 0.0001452]	
Starting torque to full load torque ratio	Tst/Tn 1.2	Mutual inductance Lm (H):	
Breakdown torque to full load torque ratio	Tbr/Tn 1.2	0.003459	
Nominal power factor	pf (%) 84	Pole pairs:	
		3	
Compute block parameters		Apply to selected block Help Close	

Com a definição das etapas e os parâmetros necessários, foi possível iniciar a modelagem do sistema que será estudado. A modelagem da máquina elétrica foi implementada utilizando o bloco *Asynchronous Machine SI Units* do ambiente Simulink do *software* MATLAB®, a Figura 3 evidencia a etapa de inserção de informações no bloco. Nessa aplicação, os parâmetros nominais do equipamento elétrico devem ser inseridos nos campos das especificações em conformidade com o sistema internacional de unidades. A escolha se deu por esta aplicação representar com fidelidade as propriedades físicas do equipamento.

A partir da conclusão de modelagem da máquina elétrica que representa a PR, realizou-se a modelagem do circuito de acionamento. Este sistema foi composto por um gerador de sinais Modulação por Largura de Pulso (PWM) que alimenta dispositivos Transistor Bipolar de Porta Isolada (IBGT) de um circuito conversor, este é responsável por gerar um sinal de tensão alternada que alimentará a máquina elétrica modelada.

Figura 4. Modelagem do sistema de regeneração de energia no Simulink do *software* MATLAB®. Fonte: Produção do próprio autor.

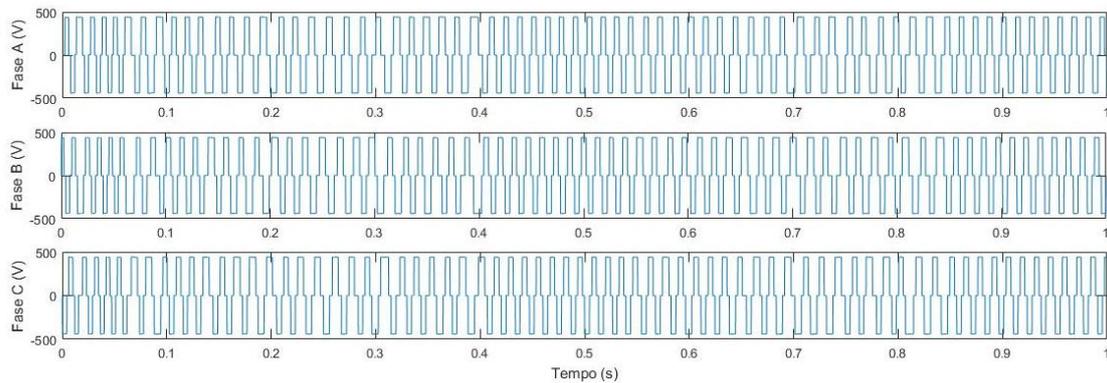


Como representado na Figura 4, a modelagem do sistema para estudo da regeneração de energia através da frenagem foi implementada no Simulink/MATLAB®. Na modelagem, da esquerda para direita, estão representados, respectivamente, o circuito gerador de sinal PWM, o circuito implementado para o conversor, e o bloco da máquina elétrica, que simboliza a PR. A alimentação da máquina elétrica no Simulink/MATLAB® é feita através da interação dos circuitos gerador de sinais PWM e conversor baseado em IGBT, ambos integram o sistema de acionamento modelado.

Com isso, foi possível concluir a etapa de modelagem do sistema que será utilizado para as simulações e estudo da regeneração de energia. Dessa maneira, a pesquisa avançou para as simulações e geração de dados para o estudo da viabilidade técnica e econômica.

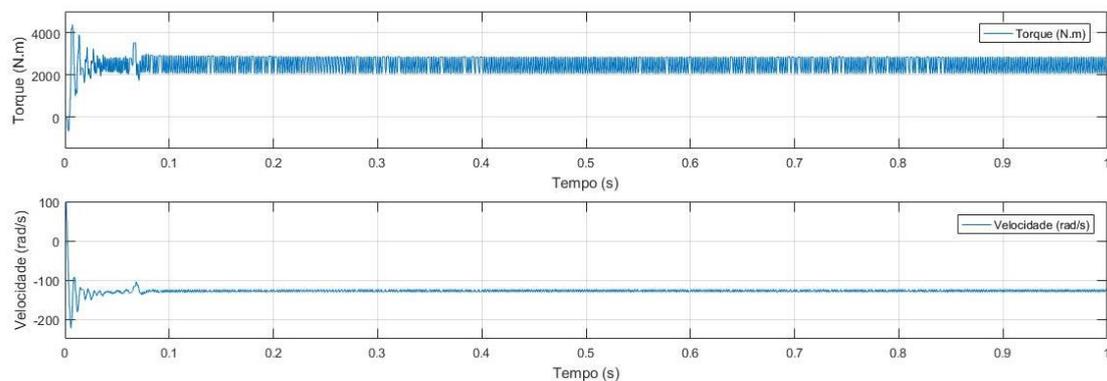
A etapa de simulação foi realizada com base nos parâmetros e configurações trazidas pela Figura 1 e pela Quadro 1 e na modelagem do acionamento e máquina elétrica implementada no Simulink/MATLAB®.

Figura 5. Sinais resultantes do circuito de acionamento da máquina elétrica. Fonte: Produção do próprio autor.



Como primeiro resultado da modelagem e das simulações, foi possível obter os sinais de saída do circuito de acionamento da máquina elétrica, resultante da interação entre o circuito gerador de sinais PWM e do conversor baseado em IGBT. A Figura 5 apresenta de forma satisfatória, que a magnitude dos sinais corresponde à tensão de alimentação da máquina elétrica definida para a pesquisa. É possível observar também que os sinais estão defasados em 120° .

Figura 6. Curvas de torque (N.m) e velocidade (rad/s) resultantes das simulações do sistema modelado. Fonte: Produção do próprio autor.



A Figura 6 traz a representação das curvas de torque e velocidade obtidas através modelagem da máquina elétrica e simulado com os sinais de entrada mostrados pela Figura 5. Como disposto na representação, os dois resultados apresentam sinais opostos, isso se deve ao fato de estarem em sentidos opostos de giro e, por consequência, representar uma situação onde a máquina elétrica esteja trabalhando como geradora de energia. Além desses fatores, é importante notar que os valores e as características das curvas estão condizentes com os parâmetros de inicialização adotados e também com as referências trazidas pelos materiais de apoio técnico. Desse modo, foi julgado a

modelagem como válida e os valores apresentados nas simulações foram trabalhados para trazer análises de viabilidade técnica e econômica.

Com a validação dos resultados encontrados e, conseqüentemente, da modelagem implementada do processo para estudo da regeneração de energia, foi possível prosseguir na pesquisa para a etapa de estudo da viabilidade. Conceitualmente, a potência no eixo da máquina é o produto escalar entre o torque e a velocidade no mesmo eixo.

$$P = T \cdot \omega \quad (1)$$

Nesse sentido, tendo posse dos dados obtidos nas curvas de torque e velocidade resultantes das simulações, é possível encontrar a potência de cada instante de tempo da simulação. Na equação (1), a potência (P) é obtida através do torque da máquina (T) e da sua velocidade (ω).

$$E = P \cdot t \quad (2)$$

De forma similar, como trazido pela equação 2, a potência (P) aplicada em determinado período de tempo (t) representa o consumo de energia (E) do equipamento. Tendo posse dos dados de potência e o tempo de trabalho da máquina, podemos determinar o consumo médio de energia em um período específico.

Utilizando as curvas de torque e velocidade encontrados nas simulações e trazidas pela Figura 6 e as condições de trabalho da máquina elétrica, apresentados pela Quadro 1, e implementando as equações (1) e (2), foi possível obter um valor médio para a potência da máquina elétrica modelada durante o período de simulações e seu consumo médio de energia durante um período de tempo determinado. Para análise posterior de viabilidade econômica, foi determinado um estudo sobre o período mensal de consumo.

Tabela 1. Média dos valores resultantes das simulações do processo modelado.

Consumo Mês (kWh)	Potência (kW)	Torque Médio (N.m)	Velocidade Média (rad/s)
3139.3	313.9	2464.4	127.5

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 1 traz a representação dos valores obtidos através das simulações realizadas na modelagem e do tratamento dos dados utilizando as propriedades matemáticas do *software* MATLAB®. Com essa etapa de obtenção dos dados das

simulações concluída e tendo posse de todos os parâmetros necessários para realizar o andamento das próximas etapas do projeto, foi possível prosseguir nos estudos e começar as análises de viabilidade econômica.

Para a realização de uma análise de viabilidade econômica da pesquisa, foram definidos alguns padrões para finalidade de comparação, sendo eles:

- O estudo considerou regeneração de energia em toda a descida da carga;
- Foi comparado a economia do custo de consumo de energia elétrica com o preço do custo para implementação da tecnologia do projeto;
- Gastos com mão de obra para a implementação e manutenção da tecnologia empregada foram desconsiderados;
- Para levantamento do custo de consumo, foram utilizadas apenas as tarifas de consumo de energia elétrica, não levando em consideração custos de demanda, impostos, tributos e encargos da unidade consumidora;
- Para definição das tarifas de consumo, foi considerado a unidade consumido referente ao estudo, presente nas modalidades de consumo e tarifária a seguir:
 - Grupo A: Tensão de fornecimento superior a 2,3 kV;
 - Subgrupo A4: Tensão de fornecimento entre 2,3 e 25 kV;
 - Modalidade tarifária verde: Apresenta diferentes tarifas de energia para diferentes horários de consumo do dia (Ponta e fora ponta);
- Considerou-se 30% do consumo em horário de ponta e 70% do consumo em horário fora ponta.

Quadro 2. Especificação das tarifas de consumo dos para análise econômica do processo a ser estudado.

TUSD Fora Ponta (R\$/kWh)	TE Fora Ponta (R\$/kWh)	TUSD Ponta (R\$/kWh)	TE Ponta (R\$/kWh)
0,09068	0,24983	1,07722	0,40695

Fonte: Extraído de EDP (2021).

O Quadro 2 traz a representação dos valores utilizados para o balanço financeiro do consumo mensal da máquina elétrica modelada operando conforme as definições estabelecidas por este projeto. Os valores compreendidos Quadro 2 são referentes às tarifas de consumo imposta pela concessionária de energia elétrica do Espírito Santo no mês de outubro do ano de 2020.

No Quadro 2, estão presentes as Tarifas do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa e Energia (TE) para os horários de ponta e fora ponta. Para o cálculo do custo de consumo de energia elétrica economizado pela regeneração de energia, será aplicado a equação (3):

$$\text{Custo de Consumo} = 0,3E.(TUSD \text{ Ponta} + TE \text{ Ponta}) + 0,7E.(TUSD \text{ Fora Ponta} + TE \text{ Fora Ponta}) \quad (3)$$

Através da equação (3), foi possível encontrar o custo de consumo economizado pela regeneração de energia, baseando-se nos dados dispostos na Quadro 2 e também nos valores obtidos através das simulações do sistema modelado.

Com a definição dos valores tarifários e tendo posse dos dados de consumo mensal do processo modelado, foi realizada uma análise comparativa para levantamento econômico. Para a implantação da frenagem regenerativa, é necessário ter um investimento técnico elevado em comparação a situação sem regeneração de energia. Para a implementação deste projeto, é fundamental a inclusão no processo de um inversor de frequência, parametrizado com a máquina elétrica do sistema, que faça o acionamento do equipamento elétrico e seja capaz de realizar o exercício de regeneração.

Quadro 3. Resultado dos cálculos para análise econômica.

Inversor de Frequência (R\$)	Custo de Consumo Mensal (R\$)	Retorno (Mês)
80000	2146,05	37,28

Fonte: Extraído de WEG (2021b).

Para a implementação do projeto, baseou-se em um modelo de inversor que apresente as características necessárias para a aplicação de um fabricante renomeado no mercado industrial. Aplicando a equação (3) nos dados trazidos pela Quadro 2 e os valores encontrados nas simulações da modelagem, foi possível encontrar os valores dispostos pela Quadro 3. Esses valores apresentam, de maneira simplificado, os resultados da análise de viabilidade econômica da implementação da regeneração de energia através da frenagem de uma máquina elétrica. Esses dados, trazidos pela Quadro 3, representam o custo da tecnologia empregada no projeto para realização da regeneração, o valor de economia mensal trazido pela regeneração e o tempo, em meses, do retorno financeiro do investimento.

3 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A metodologia utilizada para a realização desta pesquisa foi implementada utilizando as ferramentas e propriedades disponibilizadas pelo *software* MALTAB® e seu ambiente Simulink. Estas plataformas se mostraram eficientes na representação de sistemas industriais reais através da modelagem e simulação de casos, podendo ser aplicadas em diversos seguimentos de produção com eficácia.

A modelagem do processo de içamento de cargas por PR, trazida por esta pesquisa, foi parametrizada através da coleta dados e configurações de processos de estudos de campo na indústria, buscando a fidelidade dos resultados para a modelagem. Este projeto tornou possível um estudo sobre a melhora da EE na indústria através da regeneração de energia na frenagem de máquinas elétricas, fornecendo resultados condizentes com os dados e situações encontrados nos materiais científicos de apoio e no campo industrial.

Analisando tecnicamente o estudo, foi possível observar que a implantação desta tecnologia no ambiente industrial traz benefícios técnicos para a linha de produção, fornecendo um melhor sistema de acionamento e controle para o equipamento elétrico através da atuação do inversor de frequência capaz de realizar a FR. Além desse ganho, a implementação da regeneração na descida das cargas com elevadas inércias, permite o sistema deixar de dissipar a energia em forma de calor em banco de resistores, o que aquece os painéis e diminui a vida útil de equipamentos elétricos e eletrônicos.

Economicamente, o projeto traz uma análise satisfatória e promissora. De acordo com os resultados apresentados após o tratamento dos dados designados das simulações, considerando a máquina elétrica modelada trabalhando conforme as especificações e as tarifas no consumo de energia elétrica adotadas por esta pesquisa, a aplicação da tecnologia da FR torna possível o retorno financeiro do projeto em aproximadamente 38 meses. Considerando que esta tecnologia não seja aplicada em um projeto cujo regime de trabalho é baixo, a carga de içamento apresente pequena inércia e o processo seja temporário, podemos considerar que economicamente, a implantação da FR em movimentos de içamentos de cargas na indústria é viável e promissora.

De acordo com os resultados e análises dessa pesquisa, é possível inferir que a implementação da frenagem regenerativa no ambiente industrial para içamento de cargas por pontes rolantes apresenta viabilidade técnica econômica, fornecendo uma saída promissora para o aumento da eficiência energética e a redução de impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ADIB, A.; DHAOUADI, R. Modeling and analysis of a regenerative braking system with a battery-supercapacitor energy storage. **2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)**, Sharjah, p. 1–6, 2017.

BELDJAJEV, V.; LEHTLA, T.; MOLDER, H. Influence of regenerative braking to power characteristics of a gantry crane. **Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference**, Kuressaare, Estonia, p. 73–78, 2010

CHANDRAKANTA, M.; MAHAPATRA, A. A.; SAHOO, A. Comparative analysis of electrical braking performance for induction motor drive. **2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)**, Bhubaneswar, India, p. 1-6, 2018.

HEYDARI, S.; FAJRI, P.; RASHEDUZZAMAN, M.; SABZEHGAR, R. Maximizing regenerative braking energy recovery of electric vehicles through dynamic low-speed cutoff point detection. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 5, n. 1, p. 262-270, mar. 2019.

MAHAPATRA, A. A.; PRADHAN, T. Electrical braking with improved energy regeneration in induction machine drive. **2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)**, Jaipur, p. 1–6, 2016.

NETO, M. E. S.; AMORA, M. A. B.; PINTO, V. P. Método de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência Aplicados na Geração Eólica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, 2021

YOONG, M. K.; GAN, Y. H.; GAN, G. D.; LEONG, C. K.; PHUAN, Z. Y.; CHEAH, B. K.; CHEW, K. W. Studies of regenerative braking in electric vehicle. **2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology**, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 40–45, 2010.

ZARRABIAN, S.; AMANI, Y. M.; ELSAIAH, S. Experimental dynamic braking with energy storage and power generation capability for maritime industry. **2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**, Portland, OR, USA, p. 1-5, 2018.

ZHANG, J.; YUAN, Y.; LV, C.; LI Y. Modeling and analysis of regenerative braking system for electric vehicle based on amesim. **2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)**, Beijing, China, p. 1307-1312, 2015.

WEG. **Motores Elétricos.** 2021a. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/AR/pt/Motores-Elétricos/c/EU_MT. Acesso em: 03 mar. 2021.

WEG. **Inversores de Frequência.** 2021b. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/AR/pt/Drives/Inversores-de-Frequência/c/GLOBAL_WDC_DRV_IF?h=f00e85ec. Acesso em: 03 mar. 2021.

EDP. **Tarifas Aplicadas a Clientes Atendidos em Alta e Média Tensão (Grupo A).** 2021. Disponível em: <https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/tarifas-aplicadas-a-clientes-atendidos-em-alta-e-media-tensao-grupo-a>. Acesso em: 03 mar. 2021