

ANÁLISE TÉCNICA DA REGULAÇÃO DE TENSÃO NO TRANSFORMADOR DO FORNO PANELA POR VARIAÇÃO DE TAPS

Technical Analysis of Voltage Regulation in the Ladle Furnace Transformer by Tap Variation

Fáraday William Gandra

Gustavo Batista dos Santos

Luís Gustavo Mol

Prof. Me. Gustavo Schröder (Orientador)

RESUMO

O presente artigo analisa a influência da variação de taps na regulação de tensão de transformadores utilizados em fornos panela, com foco na eficiência energética, estabilidade elétrica e confiabilidade operacional. A pesquisa adota abordagem técnico-analítica, fundamentada em revisão normativa e estudo de caso experimental para avaliar os efeitos da comutação de derivação sobre tensão, a corrente e a potência fornecidas ao arco elétrico. Os resultados indicam que a variação controlada de taps pode otimizar o desempenho elétrico, reduzir perdas e contribuir para aumento da vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave: Transformador. Forno panela. Regulação de tensão. Eficiência energética. Tap changer.

1- Introdução

Segundo Santos (2019), a busca por eficiência energética tem se consolidado como uma prioridade no setor industrial, sobretudo em instalações de elevado consumo, como as siderúrgicas, que respondem por parcela expressiva do consumo nacional e global de energia. Nesse cenário, a aciaria desempenha papel estratégico no processamento do aço, e o forno panela, responsável pelo ajuste térmico do material, opera sob um sistema elétrico de elevada complexidade.

De acordo com Ribeiro (2010), o uso do transformador comutável por tap changer exerce influência direta sobre a eficiência do ciclo de produção. Embora diversos estudos abordem a eficiência térmica e metalúrgica dos processos, esta pesquisa concentra-se nos aspectos elétricos do transformador do forno panela, com ênfase na

influência da variação de taps sobre a regulação de tensão, corrente e potência fornecidas ao arco elétrico.

Conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2012), a norma NBR 5356-1:2012 — TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA — PARTE 1: REQUISITOS GERAIS — define diretrizes para a operação segura e eficiente de transformadores de potência. Essas orientações reforçam a necessidade de operação conforme as especificações técnicas e regulamentares, a fim de garantir confiabilidade, segurança e desempenho energético.

Siqueira (2025) destaca que a variação do tap constitui uma estratégia essencial para o controle de tensão, permitindo o ajuste das condições elétricas em tempo real e impactando diretamente a corrente fornecida ao forno. Esse recurso, quando otimizado, pode reduzir custos operacionais, melhorar a estabilidade do arco elétrico, diminuir o desgaste dos componentes e aumentar a confiabilidade do sistema. Tais benefícios contribuem não apenas para a eficiência econômica, mas também para a sustentabilidade e a segurança operacional no ambiente industrial.

1.1- Justificativa

Assim, compreender e aprimorar o controle de taps do transformador representa uma vantagem técnica e econômica significativa, justificando a relevância do tema para os setores produtivos e para a sociedade. A elevada demanda energética do setor siderúrgico, associada à necessidade de reduzir custos e otimizar processos, justifica a relevância deste estudo. A operação eficiente do transformador do forno panela impacta diretamente no consumo de energia elétrica, na durabilidade dos equipamentos e na estabilidade do processo produtivo. Além disso, práticas alinhadas à eficiência energética contribuem para a sustentabilidade ambiental, tema cada vez mais presente em políticas industriais e de inovação tecnológica. Assim, este trabalho contribui para a otimização operacional e para a sustentabilidade energética da indústria.

1.2– Problema de pesquisa

O controle de taps em transformadores de forno panela influencia diretamente as condições elétricas fornecidas ao arco. A falta de ajuste adequado pode gerar sobrecarga, instabilidade do arco elétrico e aumento do consumo energético. Nesse contexto, formula-se a seguinte questão norteadora:

Como a variação do *tap* em transformadores de forno panela influencia o fornecimento elétrico e pode contribuir para a eficiência do processo?

1.3 – Objetivos

O estudo tem como objetivo geral analisar a influência da variação de taps no desempenho elétrico de transformadores aplicados a fornos panela, verificando seus impactos na regulação de tensão, corrente e potência fornecidas ao arco elétrico.

Como objetivos específicos, pretende-se identificar as principais funções do tap changer em transformadores de forno panela, avaliar os efeitos da variação de taps sobre a estabilidade elétrica do arco e o consumo de energia, confrontar os resultados com os requisitos estabelecidos na NBR 5356-1:2012 e propor estratégias de operação que contribuam para a eficiência energética e a confiabilidade do processo.

Esta pesquisa é de natureza aplicada, de caráter experimental e descritivo, com abordagem técnico-analítica, fundamentada em revisão bibliográfica, normas técnicas e estudo de caso realizado a partir de dados coletados em uma planta industrial de forno panela.

2- Referencial teórico

Os transformadores de potência utilizados em fornos industriais são projetados para operar sob regimes elétricos severos, suportando grandes variações de carga e altos níveis de corrente, com requisitos de regulação de tensão precisos para estabilidade do processo. Nessas condições, a regulação de tensão deve ser precisa para assegurar estabilidade operacional, conforme explica Siqueira (2025).

O tap changer (comutador de derivação) é um dispositivo que permite alterar a relação de espiras do transformador, regulando a tensão secundária conforme a necessidade do processo. Conforme Ribeiro (2010) e Siqueira (2025), o tap changer possibilita o controle da tensão em tempo real, atendendo variações instantâneas da carga e contribuindo para a eficiência e a estabilidade elétrica do processo.

Existem dois tipos principais de comutadores de derivação: o *under-load tap changer* (ULTC), cuja comutação só pode ser feita com o transformador desligado, e o *on-load tap changer* (OLTC), que permite a comutação sob carga, sendo este último o mais comum em transformadores de fornos devido à variação dinâmica da demanda.

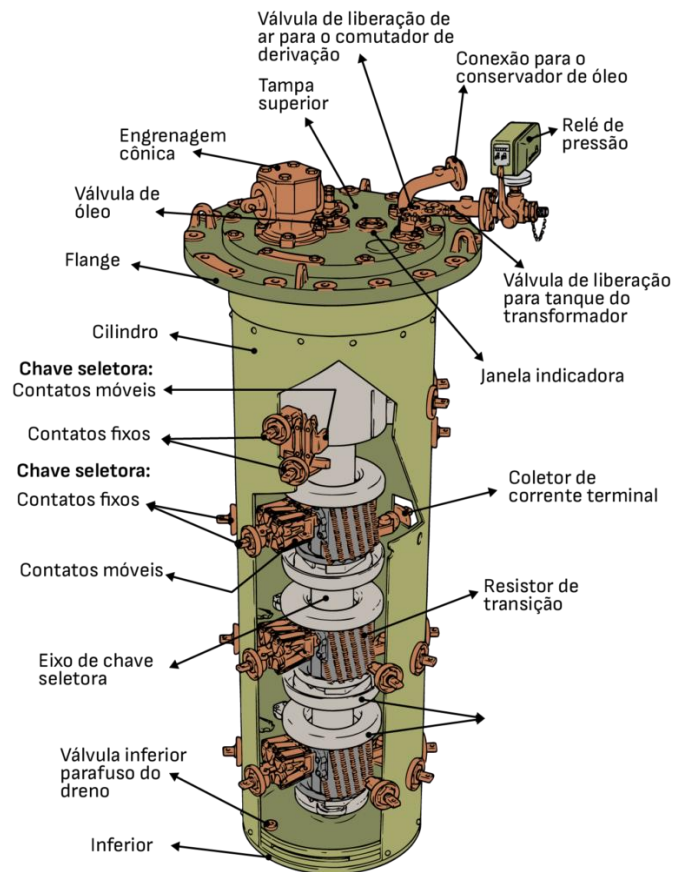


Figura 1 – Comutador de Derivação

Fonte: Mesh Engenharia, 2023

De acordo com a **NBR 8667-1:2013 — COMUTADORES SOB CARGA — PARTE 1: REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIO (ABNT, 2013)**, a operação do OLTC deve atender a critérios de segurança, tempo de comutação e corrente de carga, de modo a prevenir o desgaste prematuro do equipamento e garantir a confiabilidade do sistema elétrico.

Santos (2019) descreve que o forno panela integra o processo de refino secundário do aço, sendo responsável por ajustes térmicos e químicos que conferem homogeneidade e qualidade ao produto final. A manutenção da estabilidade elétrica é indispensável para evitar oscilações no arco, as quais podem ocasionar aumento dos custos operacionais, além de acelerar o desgaste do refratário e das abóbadas, conforme reforça Diniz (2018).

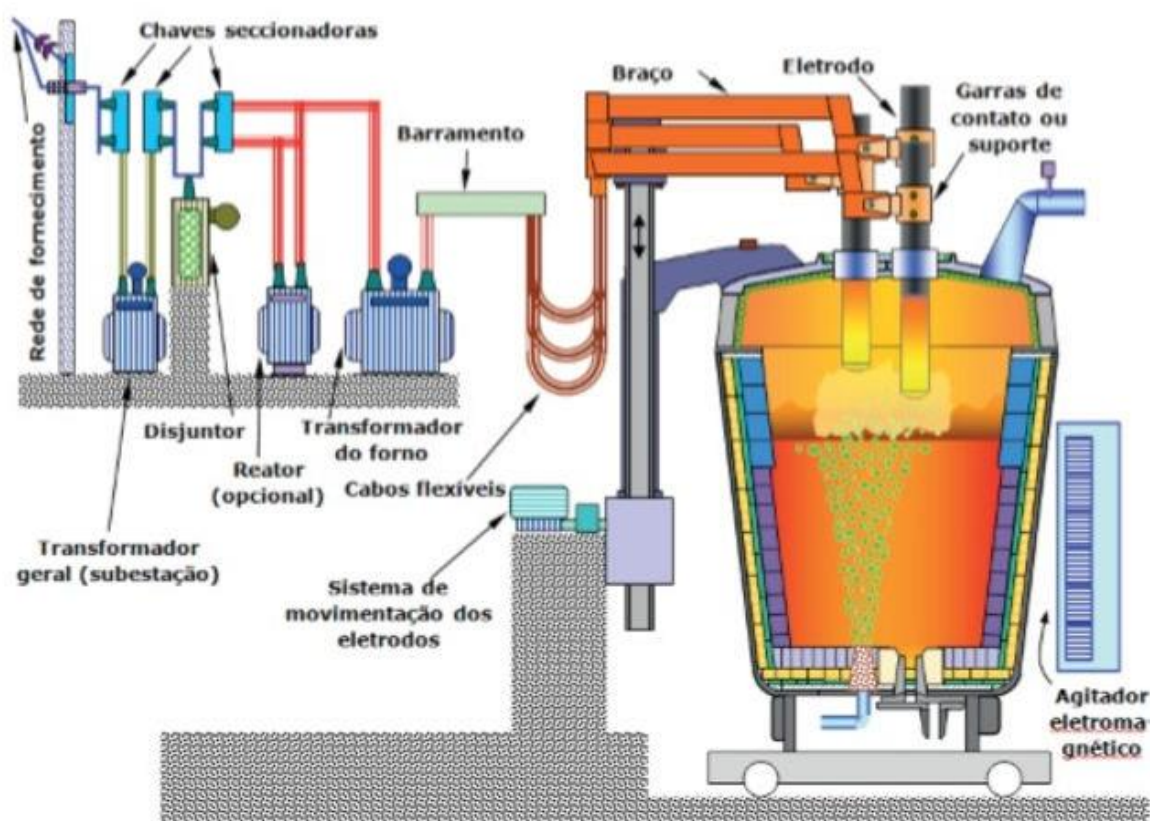


Figura 2 – Representação esquemática dos principais componentes do circuito de alimentação de energia de um forno panela do tipo corrente alternada.

Fonte: Maranhão, "s. d".

Conforme Siqueira (2025) a regulação de tensão em fornos elétricos desempenha papel determinante na busca por eficiência energética. O ajuste adequado dos *taps* permite minimizar perdas elétricas e térmicas, prolongar a vida útil dos equipamentos e otimizar a qualidade do aço obtido.

De acordo com Pereira (2024) estudos também apontam que a implementação de sistemas automatizados de controle de *taps* favorece maior estabilidade operacional e contribui para práticas mais sustentáveis no processo siderúrgico.

3- Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem técnico-analítica fundamentada em pesquisa bibliográfica e estudo de caso experimental. O objetivo é avaliar a influência da

variação de taps no desempenho elétrico de transformadores aplicados a fornos panela, verificando seus impactos na regulação de potência fornecidas ao arco elétrico.

Em outras palavras, é fundamental analisar a potência disponível, a potência total aplicada e as perdas do circuito elétrico. Esta análise envolve as variações de reatância no primário do transformador, e os valores de tensão e corrente no secundário. Serão abordados os seguintes pontos de estudo: Elaboração e Análise do Modelo e Relações Matemáticas, Levantamento de dados do Transformador e do sistema elétrico que ele faz parte.

3.1 - Elaboração e Análise do Modelo e Relações Matemáticas

De acordo com (Siqueira, 2025), a energia fornecida é gerada pelos arcos elétricos na extremidade de cada eletrodo. Logo, potência utilizada para o aquecimento da carga é a soma das potências desenvolvidas por cada um desses arcos.

$$P_u = P_{arc1} + P_{arc2} + \dots + P_{arcn}$$

onde:

$P_u =$ Potência útil;

$P_{arc1} =$ Potência do arco 1;

$P_{arc2} =$ Potência do arco 2;

$P_{arcn} =$ Potência do arco n;

No sistema equilibrado as potências são equivalentes, logo pode-se considerar para um circuito elétrico trifásico as seguintes relações matemáticas:

$$\cos \Theta = \sqrt{1 - \frac{3 \cdot (X \cdot I_e)^2}{(V_{tap})^2}}$$

$$P_W = \sqrt{3} \cdot V_{tap} \cdot I_e \cdot \cos \Theta$$

$$P_p = 3 \cdot R_p \cdot I_e^2$$

$$P_u = 3 \cdot R_{arc} \cdot I_e^2 = P_w - P_p$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_{tap} \cdot I_e \cdot \text{sen } \theta = 3 \cdot X \cdot I_e^2$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{tap} \cdot I_e$$

onde:

$\cos \theta$ = Fator de Potência;

I_e = Corrente Média nos Eletrodos (kA);

X = Reatância Equivalente do Circuito Secundário (m Ω);

P_w = Potência Ativa (kW);

P_p = Potência Passiva ou de Perdas (kW);

P_u = Potência Util (kW);

Q = Potência Reativa (kVAr);

S = Potência Aparente (kVA);

V_{tap} = Tensão entre Fases no Secundário do Transformador (V);

R_p = Resistência de Perdas (m Ω);

R_{arc} = Resistência do Arco (m Ω);

A partir do desenvolvimento das equações, é realizada em ambiente computacional, por meio do software MATLAB, a elaboração do modelo matemático, com a análise as respostas de tensão, corrente e potência em diferentes posições de tap. Essa metodologia, de natureza experimental e descritiva, possibilita compreender o desempenho do sistema elétrico operando com comutação sob carga, identificando ganhos potenciais de eficiência e estabilidade, com base em dados reais coletados na planta industrial e sem a necessidade de intervenção física no equipamento.

3.2 - Levantamento de Dados do Sistema

O levantamento de dados contempla informações operacionais de um transformador utilizado em forno panela da indústria siderúrgica, abrangendo aspectos como potência nominal, relação de espiras, tipo de comutador de tap (tap changer) e tensões de operação. Esses dados são obtidos a partir de manuais técnicos, da placa

de identificação do equipamento e, quando necessário, por meio de consulta a profissionais do setor.

Com base nessas informações, é realizado um estudo comparativo entre diferentes posições de tap, analisando as variações de tensão e corrente no secundário. A partir desses valores, calcula-se a potência elétrica fornecida e estimam-se os possíveis ganhos de eficiência no processo de fornecimento de energia.

A análise elétrica envolve a comparação das correntes resultantes em diferentes posições de tap, a avaliação do fator de potência e das perdas elétricas, bem como a verificação de compatibilidade com os limites de projeto do transformador. O equipamento estudado realiza a comutação de taps sob carga, por meio de um sistema *on-load tap changer* (OLTC), que possibilita o ajuste da tensão durante a operação sem necessidade de interrupção. Dessa forma, o foco da análise está no comportamento elétrico do transformador frente às variações de tap, avaliando o impacto de cada posição sobre a estabilidade e a eficiência do sistema.

Tabela 1: Dados de placa do transformador do forno panela

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	CORRENTE (A)*	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	CORRENTE (A)*	TAP	CONEXÃO	POTÊNCIA (MVA)	POTÊNCIA (MVA)*
13800	753	979	356	29192	37969	13	1-A	18.0	23.4
			336	30929	40203	12	2-A		
			318	32680	42484	11	3-A		
	713	927	301	32680	42484	10	4-A	17.04	22.15
	680	884	287			9	5-A	16.25	21.13
	649	843	274			8	6-A	15.51	20.16
	618	803	261			7	7-A	14.77	19.20
	592	770	250			6	8-A	14.15	18.40
	568	738	240			5	9-A	13.58	17.65
	547	711	231			4	10-A	13.08	17.0
	526	684	222			3	11-A	12.57	16.34
	507	659	214			2	12-A	12.11	15.74
	490	638	207			1	13-A	11.72	15.24

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

3.3 – Análise dos Taps 9, 10, e 11

Os dados experimentais obtidos para as posições de TAP 9, 10 e 11 são apresentados na Tabela 2, utilizada para a análise comparativa de eficiência e potência. Foram registradas 20 amostras por posição de TAP, totalizando 60 leituras, além de três médias finais que representam o comportamento elétrico médio de cada posição.

Tabela 2: Dados de medição dos Taps 9, 10 e 11

TAP	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (MVA)
9.00	288.49	942.63	21.28
9.00	286.59	874.97	21.16
9.00	288.94	886.70	21.11
9.00	291.57	827.01	21.07
9.00	286.30	862.22	20.83
9.00	286.30	888.44	20.99
9.00	291.74	837.96	21.04
9.00	289.30	899.03	21.34
9.00	285.59	859.97	21.20
9.00	288.63	872.33	20.78
9.00	285.61	859.93	21.19
9.00	285.60	958.09	21.05
9.00	287.73	883.46	20.99
9.00	281.26	841.69	21.25
9.00	281.83	916.90	21.34
9.00	285.31	835.17	21.32
9.00	283.96	892.35	20.96
9.00	287.94	805.61	21.07
9.00	284.28	830.87	21.20
9.00	282.76	891.87	21.33
10.00	299.56	918.21	21.87
10.00	300.44	941.28	22.07
10.00	297.68	986.12	22.08
10.00	297.41	906.27	21.99
10.00	303.44	894.66	22.12
10.00	305.07	906.93	22.23
10.00	300.78	963.62	22.53
10.00	304.01	940.15	22.18
10.00	302.08	905.81	22.20
10.00	299.06	947.53	22.14
10.00	302.08	930.88	21.77
10.00	305.61	965.75	22.14
10.00	300.89	898.92	22.16
10.00	305.69	913.89	22.64
10.00	293.14	911.32	22.11
10.00	303.47	868.46	22.21
10.00	301.26	938.84	22.14
10.00	300.10	937.44	21.92
10.00	301.28	927.20	22.38
10.00	295.04	917.62	22.30
11.00	320.37	988.10	22.21
11.00	315.27	1031.29	22.56
11.00	322.21	914.70	22.63
11.00	313.79	986.39	22.24
11.00	319.76	989.40	22.59
11.00	324.57	1010.27	22.48
11.00	315.03	929.52	22.56
11.00	316.30	926.18	22.78
11.00	318.30	999.88	22.35
11.00	316.49	990.88	22.25

11.00	313.35	989.02	22.22
11.00	318.21	992.86	22.24
11.00	314.81	951.80	22.38
11.00	319.42	988.29	22.47
11.00	315.24	990.72	22.46
11.00	322.65	950.43	22.57
11.00	315.65	1053.63	22.40
11.00	317.03	997.95	22.69
11.00	320.44	931.35	22.35
11.00	314.31	1005.26	22.94
9 (Média)	286.49	873.36	21.12
10 (Média)	300.91	926.05	22.16
11 (Média)	317.66	980.90	22.47

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

3.4 - Gráficos de Análise

As medições demonstram a variação progressiva de tensão e corrente conforme o ajuste de TAP, o que impacta diretamente a potência entregue ao arco elétrico. A relação entre essas variáveis é observada nos gráficos da Figuras 3 e 4.

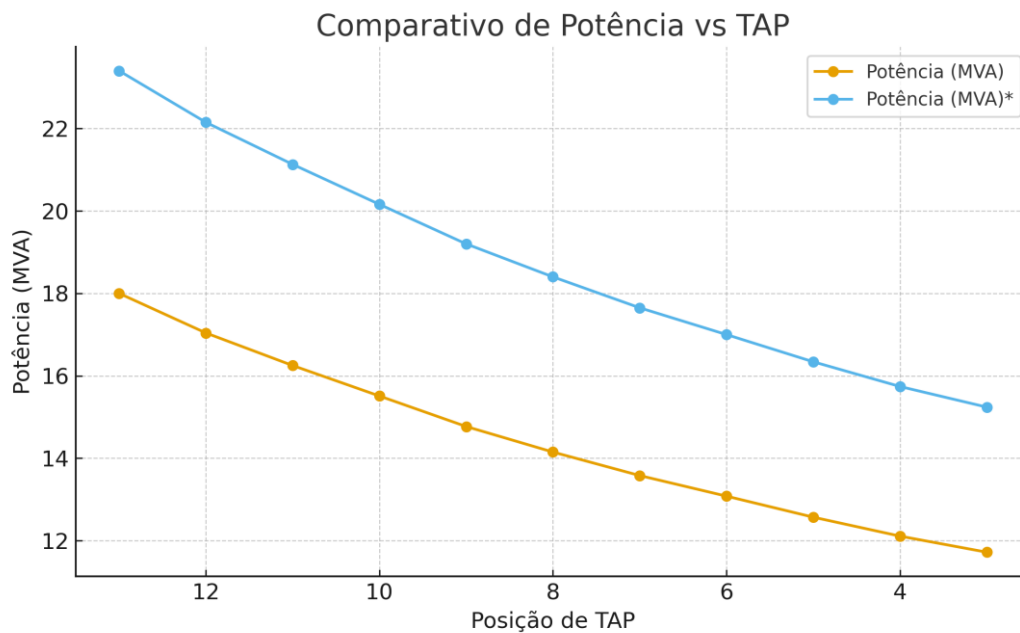


Figura 3 — Comparativo de potência entre os TAPs.

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

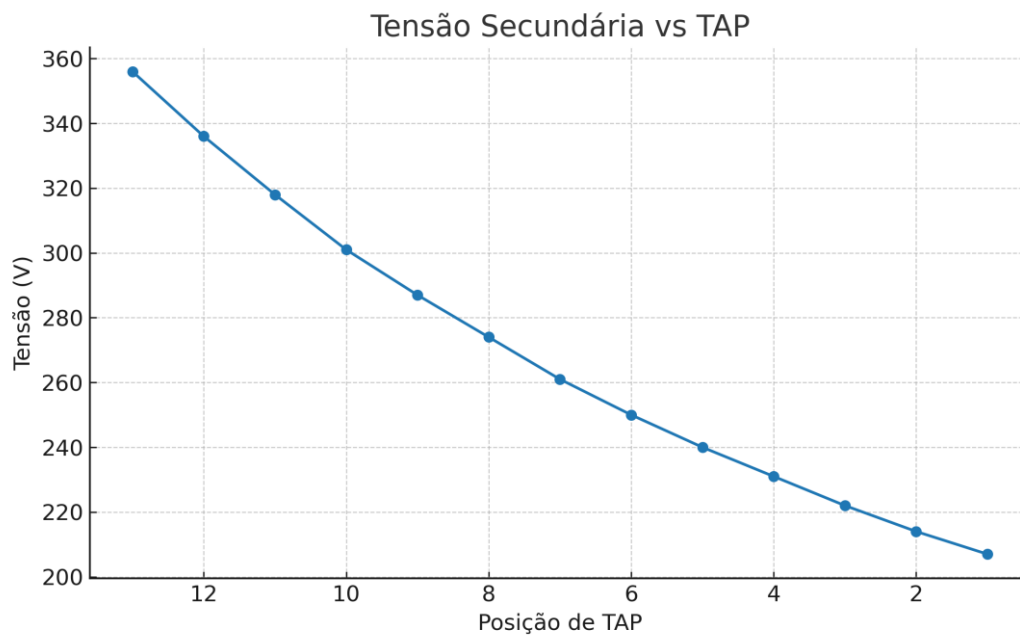


Figura 4 — Variação da tensão em função do TAP.

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Conforme apresentado nas Figuras 3 e 4, os TAPs 9, 10 e 11 representam níveis progressivos de tensão, com aumento correspondente da potência fornecida. A Tabela 3 resume os valores médios obtidos para cada posição de TAP.

Tabela 3: Resultados médios de tensão, potência e eficiência

TAP	Tensão	Potência	Eficiência
9	287 V	21,13 MVA	93%
10	301 V	22,15 MVA	97%
11	318 V	22,40 MVA	95%

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A análise estatística dos registros experimentais de cada TAP apresentou margens de erro reduzidas, indicando boa confiabilidade dos dados. As margens calculadas, considerando um intervalo de confiança de 95%, foram de aproximadamente $\pm 1,4$ V para tensão, ± 18 A para corrente e $\pm 0,09$ MVA para potência. Esses valores confirmam a estabilidade das medições e reforçam a consistência dos resultados observados.

4- Resultados e discussão

A Figura 5 apresenta o comparativo entre eficiência e potência para os TAPs 9, 10 e 11, evidenciando o comportamento elétrico do transformador sob diferentes condições de comutação.

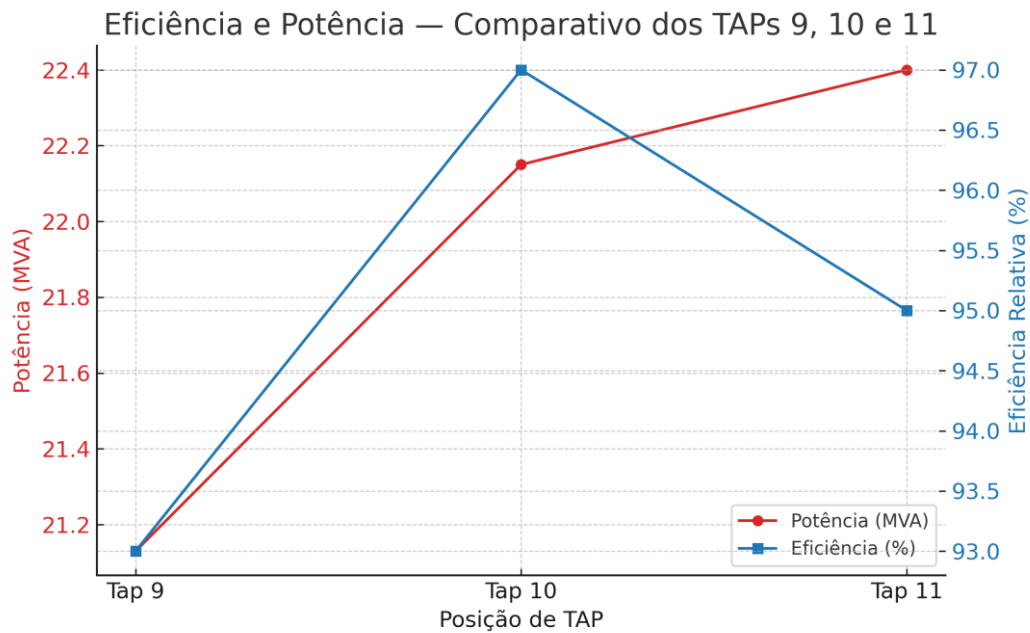


Figura 5 – Comparativo de eficiência e potência para os TAPs 9, 10 e 11.

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

A análise dos resultados obtidos permite compreender o comportamento elétrico do transformador de forno panela diante da variação de taps. Observa-se que pequenas alterações na posição do tap resultam em mudanças significativas na tensão e na corrente do circuito secundário, afetando diretamente a potência entregue ao arco elétrico.

Os resultados mostram um aumento de 4,8% na potência útil ao passar do TAP 9 para o TAP 10, acompanhado de um acréscimo de aproximadamente 3 a 4 pontos percentuais na eficiência. Por outro lado, o aumento de TAP 10 para TAP 11 gerou ganho energético marginal (<1%), com ligeira queda na eficiência devido às perdas resistivas e magnéticas adicionais.

A variação de taps influencia diretamente a estabilidade da tensão de saída do transformador, permitindo compensar flutuações que ocorrem durante o processo de refino do aço. Essa regulação contribui para manter o arco elétrico mais estável,

reduzindo picos de corrente e o estresse térmico sobre os componentes do sistema. Esse resultado está em conformidade com Ribeiro (2010), que destaca a importância da regulação de tensão no desempenho dos transformadores utilizados em fornos industriais.

A partir dos dados coletados durante a operação, observou-se que o aumento da tensão secundária, proporcionado pela elevação do tap, gera maior corrente no arco, aumentando a potência instantânea entregue ao forno. Contudo, o excesso de corrente também pode provocar elevação de temperatura e desgaste acelerado dos eletrodos e refratários, conforme destacado por Siqueira (2025). Desta forma, o controle preciso da posição do tap é essencial para o equilíbrio entre desempenho e durabilidade dos equipamentos.

Os resultados confirmam que, o controle adequado de taps reduz o consumo energético global do sistema e melhora o rendimento do processo de refino secundário. Essa otimização não apenas impacta os custos operacionais, mas também contribui para a sustentabilidade energética da indústria siderúrgica, uma vez que a eficiência elétrica está diretamente relacionada à redução de perdas de energia. A comparação entre as diferentes posições de tap permitiu observar que a eficiência máxima é alcançada quando a tensão secundária mantém o arco elétrico em regime estável, evitando tanto o superaquecimento quanto a interrupção do arco. Esse resultado reforça as observações de Santos (2019) sobre a relevância da estabilidade elétrica para a qualidade do aço e a confiabilidade dos transformadores.

Dessa forma, a análise dos resultados comprova que o controle do tap changer é uma ferramenta estratégica para o aprimoramento do processo elétrico em fornos panela. O estudo confirma a relevância técnica do ajuste de tensão em tempo real e evidencia como essa prática pode contribuir para o aumento da eficiência e da confiabilidade operacional no setor siderúrgico.

5- Conclusão e recomendações

A partir do estudo realizado, conclui-se que a variação de taps em transformadores de forno panela exerce influência direta sobre a regulação de tensão, corrente e potência do sistema elétrico. A análise permitiu compreender de forma detalhada como o controle de taps contribui para a estabilidade do arco elétrico e para a eficiência operacional do processo de refino secundário do aço.

Com base nos dados experimentais analisados, verificou-se que o aumento do TAP eleva a potência disponível, mas também aumenta as perdas elétricas e o desgaste dos componentes. Entre as posições analisadas, o TAP 10 apresentou o melhor equilíbrio entre ganho de energia e eficiência global com potência média próxima a 22,15 MVA com eficiência relativa de cerca de 97%, superando o TAP 9 (menor potência e eficiência) e mantendo desempenho superior ao TAP 11 (maior potência, mas com eficiência levemente inferior). Esse comportamento caracteriza o TAP 10 como o ponto ótimo de operação, maximizando o aproveitamento energético sem comprometer a durabilidade dos eletrodos e refratários. Portanto, pode-se afirmar que a escolha adequada da posição de TAP é fundamental para o controle eficiente do forno panela. O TAP 10 se destaca como o ajuste ideal, equilibrando produtividade e eficiência energética. Como perspectiva futura, recomenda-se correlacionar esses resultados elétricos com as curvas reais de aquecimento (tempo x temperatura), de modo a quantificar com maior precisão o desempenho térmico e os ganhos de eficiência global do processo.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a regulação de tensão em transformadores de forno panela, oferecendo uma abordagem aplicada que integra fundamentos teóricos, normativos e práticos. No campo industrial, os resultados apresentados podem subsidiar estratégias de operação mais eficientes, promover a redução de custos energéticos e aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos empregados em processos siderúrgicos, evidenciando o potencial da engenharia elétrica na melhoria contínua da produtividade e da sustentabilidade do setor.

6- Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1:2012 - TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA — PARTE 1: REQUISITOS GERAIS**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-7:2017 - TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA — PARTE 7: GUIA DE CARREGAMENTO DE TRANSFORMADORES IMERSOS EM LÍQUIDO ISOLANTE**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8667-1:2013 - COMUTADORES SOB CARGA — PARTE 1: REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIO**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8667-2:2013 - COMUTADORES SOB CARGA — PARTE 2: GUIA DE APLICAÇÃO**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

DINIZ, P. H. de A. *Análise do consumo energético de forno elétrico a arco voltaico utilizado em indústria metalúrgica nacional*. 74 p. — Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

RIBEIRO, D. B. *Curso de refino secundário dos aços*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010. 258 p.

SANTOS, H. P. C. *Redução do consumo específico de energia elétrica total no processo de fusão em um forno elétrico a arco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

SIQUEIRA, O. A. *Otimização dos parâmetros do sistema elétrico de potência que alimenta um forno panela*. 65 p. — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2025.

PEREIRA, A. R. *Influência da alteração da escória do forno panela e seus impactos em aços fabricados em uma siderúrgica semi-integrada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

MARANHÃO, E. A. *Introdução ao processo de forno panela*. EAM Assessoria e Treinamentos no Processo Industrial e Segurança do Trabalho, [s.l.], s.d. Disponível em: <https://eam2016freelancer.wixsite.com/edilsonalvesmaranhao/artigo-introducao-ao-processo-de-fo-1>. Acesso em: 14 set. 2025.

MESH ENGENHARIA. *Comutador de derivação de tensão motorizado*. Mesh Engenharia, 30 jun. 2023. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2023/06/30/comutador-de-derivacao-de-tensao-motorizado/>. Acesso em: 14 set. 2025.