



1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Avaliação de alternativas para a efficientização do aproveitamento de gases siderúrgicos visando repotenciação do sistema de cogeração das utilidades
Evaluation of alternatives for efficient use of the steelmaking gases aiming at repowering the utilities cogeneration system

João Vitor Santa Clara Prado¹, Pablo Rocha Dalvi¹, Igor Chaves Belisario², Francisco Mello Fonseca^{2*}, José Joaquim Conceição Soares Santos³

¹ Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus Vitória, ES, Brasil

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus Vitória, ES, Brasil

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus Vitória, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: franciscomello@msn.com

Resumo: No Espírito Santo, a indústria siderúrgica é responsável por mais de 60% das emissões do setor de indústria e energia, quase 35% das emissões totais, cenário para aplicação da eficiência energética como estratégias de descarbonização. Este estudo analisa a rota de ciclos combinados para repotenciação, com consequente aumento da eficiência no aproveitamento dos gases siderúrgicos em uma siderúrgica do estado, com foco na redução das emissões específicas. A indústria estudada aproveita a energia térmica e química dos gases siderúrgicos para gerar cerca de 500 MW, potência essa que é quase toda gerada em seis unidades de cogeração com turbinas vapor. A avaliação focou na Unidade Termelétrica 1 (UTE-1), com a proposta do acoplamento de uma turbina a gás ao sistema de cogeração a vapor, configurando um ciclo combinado, mantendo os mesmos parâmetros do ciclo a vapor. A modelagem da planta foi feita no *software* IPSEpro, para o cálculo das potências, disponibilidade energética dos gases e eficiências. Três cenários foram definidos, sendo que o primeiro (caso 0) é correspondente ao atual, o segundo (caso 1) um ciclo combinado que usa um compressor para pressurizar os gases siderúrgicos e o terceiro (caso 2) avalia o impacto da ausência do compressor de gases siderúrgicos. Os resultados mostram que, do caso 0 para o caso 1, a eficiência elétrica líquida muda de 29,23 a 45,40%, enquanto a eficiência líquida da cogeração varia de 33,88 a 51,50%. Já o caso 2, que não usa o compressor de gases siderúrgicos, alcança 48,00% de eficiência elétrica líquida e 53,76% de eficiência líquida da cogeração. As eficiências do caso 1, sugerem futuros estudos de um ciclo a vapor com caldeira supercrítica, que pode superar este ciclo combinado.

Palavras-chave: repotenciação, efficientização, ciclo combinado, descarbonização, transição energética.

Abstract: In Espírito Santo, the steel industry is responsible for over 60% of emissions of the industrial and energy sectors, almost 35% of total emissions, providing a prime scenario for the application of energy efficiency as a decarbonization strategy. This study analyzes the combined cycle path for repowering, with a consequent increase in the efficiency of steelmaking gases use in a steel mill of the state, focusing on reducing specific emissions. The industry studied harnesses the thermal and chemical energy of steelmaking gases to generate approximately 500 MW, almost all of which is generated by six steam turbine cogeneration units. The evaluation focused on Thermoelectric Unit 1 (UTE-1), with the proposal to couple a gas turbine to the steam cogeneration system, creating a combined cycle, while maintaining the same parameters of the steam cycle. The plant was modeled using IPSEpro software to calculate power output,

gas energy availability, and efficiencies. Three scenarios were defined: the first (case 0) corresponds to the current one, the second (case 1) a combined cycle using a compressor for the steelmaking gases, and the third (case 2) evaluates the impact of the absence of the compressor. The results show that, from case 0 to case 1, the net electrical efficiency changes from 29.23 to 45.40%, while the net cogeneration efficiency varies from 33.88 to 51.50%. Case 2, which does not use compressor, achieves 48.00% of net electrical efficiency and 53.76% of net cogeneration efficiency. The efficiencies of case 1 suggest studies of a supercritical boiler steam cycle, which could outperform this combined cycle.

Keywords: repowering; efficiency; combined cycle; decarbonization; energy transition.

1 Introdução

As ações humanas têm provocado impactos significativos no meio ambiente nos últimos anos, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), destacando-se o dióxido de carbono (CO₂). As atividades industriais são responsáveis pela maior parte dessas emissões, com destaque para os setores de energia, siderurgia, agropecuária e transportes (IEA, 2020).

No setor siderúrgico, a produção de aço gera grande quantidade de CO₂, variando conforme o processo utilizado, estimando-se 2,6 gigatoneladas anuais (IEA, 2020). Isso ocorre devido à dependência do carvão e do coque como combustíveis e agentes redutores. Com a produção de aço prevista para crescer, é necessário implementar novas rotas tecnológicas que reduzam essas emissões.

Enquanto a matriz energética brasileira é predominantemente hidrelétrica, no Espírito Santo a maior parte da geração é termelétrica (54,06% da capacidade instalada, equivalente a 1,2 GW), concentrada em grandes empresas como a ArcelorMittal, com cerca de 500 MW (EPE, 2022). A oferta interna bruta estadual destaca carvão mineral e coque, que representam 40,5% da energia, enquanto óleo diesel, gases siderúrgicos e óleo combustível correspondem a mais de 65% da distribuição bruta energética.

Em 2022, o governo do Espírito Santo aderiu às campanhas “*Race to Zero*” e “*Race to Resilience*”, apresentando o Plano Estadual de Descarbonização e Neutralização de Emissões de GEE, com objetivo de atingir a neutralidade até 2050 (UNFCCC, 2022). O plano define diretrizes para indústrias de siderurgia e energia, apoiando-se em políticas públicas, estratégias econômicas, incentivos fiscais, linhas de crédito e atração de investimentos público-privados (Governo do Estado do Espírito Santo, 2022).

A indústria do aço no Espírito Santo é economicamente relevante, gerando receitas, empregos e investimentos. Atualmente, opera com seis unidades termelétricas a vapor com cogeração de energia elétrica, mas essa configuração não é a mais eficiente. Apesar do reaproveitamento de gases siderúrgicos, há potencial para melhoria, por exemplo, incorporando turbinas a gás em ciclo combinado. Modernizar unidades existentes com ciclos combinados aumenta a eficiência energética e reduz impactos ambientais, transformando ativos pouco produtivos em sistemas mais competitivos. Além disso, a repotenciação em locais e instalações existentes pode reduzir custos em 20-40% em comparação à construção de novas usinas, oferecendo vantagens ambientais e regulatórias. Espera-se que essas estratégias contribuam significativamente para o aumento da capacidade de geração na próxima década (Shahnazari e Abbassi, 2003).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre o uso de ciclos combinados e repotenciação em uma indústria siderúrgica do Espírito Santo, para o melhor reaproveitamento dos gases de exaustão do processo industrial, de modo a contribuir para descarbonização do estado. A análise será conduzida por meio de três estudos de caso, considerando o atual sistema de cogeração e proposta com ciclo combinado. As simulações serão realizadas com auxílio do *software* IPSEpro, utilizando dados e informações disponíveis em literatura.

2 Estudo de caso e metodologia

A indústria siderúrgica ArcelorMittal Tubarão, localizada na grande Vitória, no estado do Espírito Santo, conta com seis unidades termelétricas, em que quatro delas utilizam gases do processo produtivo para gerar energia. As seis juntas totalizam uma capacidade de geração que atinge aproximadamente 500 MW, equivalendo à quantidade de energia elétrica necessária para abastecer cerca de 1,4 milhão de residências. A central conta também com uma turbina de recuperação de topo (TRT) no alto-forno 1 que produz cerca de 18 MW, aproveitando os gases de alto-forno devido sua pressão, temperatura e volume (ArcelorMittal, 2022).

2.1 IPSEpro: software de simulação

A metodologia envolve modelar a repotenciação de uma das unidades termelétricas da planta siderúrgica da ArcelorMittal para avaliar o aproveitamento dos gases de exaustão como fonte de geração mecânica e elétrica, visando aumentar a eficiência e reduzir emissões de GEE no produto final. As simulações foram conduzidas no *software* IPSEpro, desenvolvido pela empresa austríaca SimTech (2025). O IPSEpro é uma ferramenta avançada para modelagens e simulações de plantas e processos térmicos, capaz de realizar cálculos precisos de balanços de massa e energia e permite elaborar fluxogramas detalhados. Trata-se de um *software* comercial, cuja licença foi adquirida pela Universidade Federal do Espírito Santo.

2.2 Sistema de cogeração atual

A unidade termelétrica de estudo é a UTE-1, adotada como sendo o caso 0, e seu fluxograma é representado na Figura 1. Os dados utilizados para simulação foram obtidos de referências bibliográficas específicas (Donatelli, 1993; Silva, 2004; Belisario, 2012) e estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Esta unidade trabalha com um ciclo Rankine regenerativo, e possui três aquecedores fechados sendo eles de baixa, média e alta pressão (AQBP, AQMP e AQAP), respectivamente. Além disso, possui desaerador (aquecedor aberto), turbina de extração com cinco estágios, caldeira, condensador, dessuperaquecedor e duas bombas. Ressalta-se que na caldeira, a queima se dá com a mistura dos gases COG (*coke oven gas*) e BFG (*blast furnace gas*) na proporção 5/95 em volume. O propósito de manter esse tipo de proporção é garantir uma estabilidade de queima, pois o BFG possui baixo poder calorífico inferior (PCI).

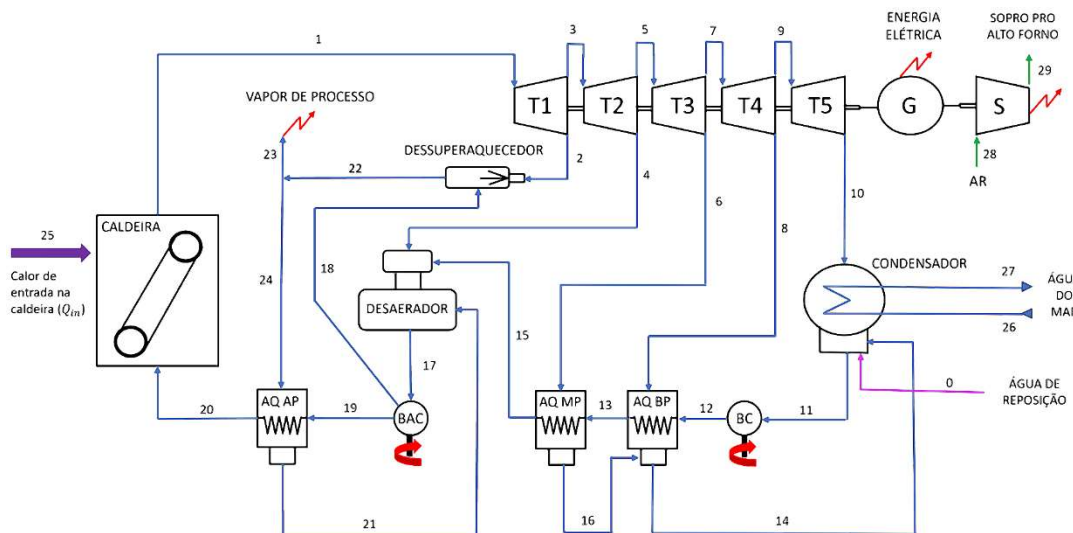


Figura 1. Fluxograma simplificado da 1ª unidade da central de cogeração siderúrgica. Fonte: (Belisario, 2012).

Tabela 1. Parâmetros dos gases siderúrgicos. Fonte: (Silva, 2004; Belisario, 2012)

Parâmetros	BFG	COG
Poder calorífico inferior (PCI), kcal/Nm ³	803	4.362
Massa específica, kg/Nm ³	1,370	0,454
Relação ar/gás	0,646	4,658
Disponível para geração de potência, kg/s	231,354	2,314
Vazão consumida na caldeira, kg/s	70,0	1,0

Tabela 2. Condições operacionais da planta de cogeração a vapor atual. Fonte: (Belisario, 2012)

Parâmetros	Valores
Vazão de vapor na entrada da turbina, kg/s	70,0
Temperatura de vapor na entrada da turbina, °C	510
Pressão de vapor na entrada da turbina, bar	86
Temperatura da água de alimentação de caldeira, °C	195
Pressão da água de alimentação de caldeira, bar	93
Vazão de ar soprado para o alto-forno, kg/s	148,9
Vazão de vapor para processo, kg/s	4,0
Potência elétrica nos bornes do gerador, MW	35
Potência na saída da turbina, MW	68

O processo inicia com o vapor gerado na caldeira entrando no primeiro estágio da turbina de condensação, onde parte é extraída e enviada ao dessuperaquecedor para ajuste de temperatura e pressão antes de alimentar o processo e o aquecedor de alta pressão; no segundo estágio o vapor alimenta o desaerador para pré-aquecer a água e remover gases dissolvidos; nos terceiro e quarto estágios as extrações alimentam os aquecedores de média e baixa pressão; a exaustão da turbina envia o condensado ao condensador para resfriamento por água do mar, sendo depois bombeado pela bomba de condensado (BC) aos aquecedores de baixa e média pressão; após a desaeração a bomba de alimentação (BAC) succiona a água, parte passa pelo aquecedor de alta pressão para alimentar a caldeira e parte vai ao dessuperaquecedor para controle de parâmetros de temperatura e pressão para o processo; na caldeira, combustível e ar são queimados nos queimadores para gerar vapor que retorna à turbina, reiniciando o ciclo.

Para a simulação no *software* IPSEpro, foi estabelecida uma perda de carga na caldeira de 7 bar, valor próximo aos 7,02 bar encontrados por Belisario (2012). As eficiências mecânica e isentrópica da turbina foram consideradas como 100% e 90%, respectivamente, enquanto a eficiência elétrica do gerador foi assumida em 98%. Além disso, a bomba foi modelada com eficiência isentrópica de 85%. Para simplificação, adotou-se uma perda de carga nos pré-aquecedores, de forma a não utilizar uma válvula de expansão como componente adicional.

Após a simulação, foram obtidas informações sobre as propriedades e os estados termodinâmicos em cada linha de fluxo e equipamento disposto no fluxograma da Figura 1. A partir destas informações, foram realizados os cálculos das eficiências energéticas da planta. A eficiência líquida do sistema de potência η_{PL} (somar a potência elétrica nos bornes do gerador acionado pelas turbinas a vapor com a potência mecânica destinada ao soprador de ar do alto-forno e descontar as potências das bombas) é calculada pela Eq. 1

$$\eta_{PL} = \frac{\dot{W}_{PL}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}}, \quad (1)$$

sendo \dot{W}_{PL} a potência líquida do sistema de potência, \dot{m}_{comb} a vazão mássica de combustível e PCI_{comb} o poder calorífico inferior do combustível. A eficiência do ciclo a vapor η_{CV} é dada pela Eq. 2

$$\eta_{CV} = \frac{\dot{W}_{L,vapor}}{\dot{Q}_{inC}}, \quad (2)$$

onde $\dot{W}_{L,vapor}$ é a potência líquida do ciclo a vapor (diferença entre a potência gerada pelas turbinas a vapor e as potências consumidas pelas bombas) e \dot{Q}_{inC} é o calor de entrada na caldeira. Outra eficiência importante é a global da cogeração, devido a contribuição do calor útil ao processo. A eficiência líquida da cogeração η_{CoL} é calculada conforme a Eq. 3

$$\eta_{CoL} = \frac{\dot{W}_{PL} + \dot{Q}_{util}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}}, \quad (3)$$

sendo \dot{Q}_{util} o calor útil do vapor desviado para atender outros processos industriais. Todas essas equações (Eqs. 1 a 3) são definições conceituais de eficiências que podem ser encontradas em qualquer referência.

2.3 Proposta para repotenciação com ciclo combinado

Partindo do caso atual da UTE-1, é proposta uma repotenciação a partir de um ciclo combinado com turbina a gás, mantendo o ponto de operação do ciclo a vapor atual. Ressalta-se que a justificativa para este estudo ocorre pelo fato de que o ciclo combinado possui uma eficiência energética maior que os ciclos a vapor e a gás teriam isoladamente (Moran et al., 2018).

Na proposta da planta com a adaptação para ciclo combinado, para a turbina a gás genérica foram realizados dois casos para simulação:

- Caso 1: Instalar um compressor na saída da mistura dos gases siderúrgicos, para que iguale a pressão na câmara de combustão, devido a compressão do ar, conforme Figura 2(a).
- Caso 2: Não instalar um compressor na saída da mistura dos gases siderúrgicos, de modo a aproveitar as altas pressões que os gases possuem quando saem de seus processos, como é aproveitado pela TRT no alto-forno, em que não necessitem dessa compressão, que demanda uma potência elevada, conforme Figura 2(b).

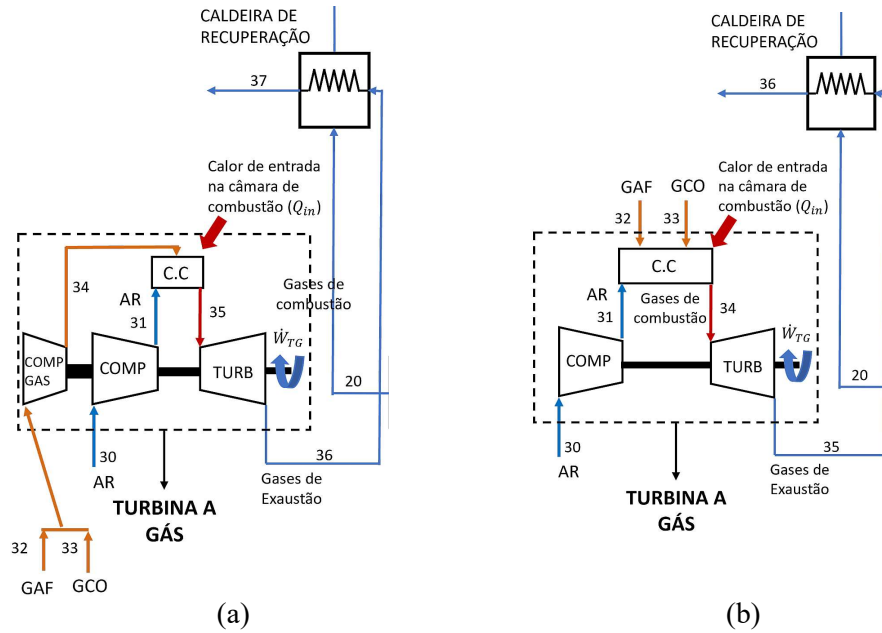


Figura 2. Fluxogramas para repotenciação da UTE-1 (a) com compressor de gás (caso 1) e (b) sem o compressor de gás (caso 2).

Segundo Silva (2004) e Ferreira (2015), quando o fornecimento do gás ocorre em baixa pressão, torna-se necessária a instalação de um compressor acoplado ao mesmo eixo da turbina a gás. Nesse arranjo, o compressor que comprime os gases siderúrgicos opera com a mesma relação de pressão do compressor responsável pela compressão do ar atmosférico que entra na câmara de combustão.

No cenário em que não se utiliza compressor para os gases siderúrgicos, estes já chegam pressurizados por linhas de pressão ou por válvulas reguladoras, como ocorre na TRT, onde há geração de energia a partir da alta pressão dos gases do alto-forno. Assim, o ar atmosférico e os gases siderúrgicos entram na câmara de combustão com a mesma relação de pressão, dispensando o uso do compressor.

Para a realização da simulação do ciclo combinado, foi utilizada uma caldeira de recuperação com apenas um nível de pressão. Adotou-se eficiência isentrópica de 85% nos compressores, com relação de pressão de 12, e temperatura de saída dos gases de combustão de 1.150 °C. A temperatura dos gases de exaustão na saída da caldeira foi fixada em 240 °C, garantindo assim os requisitos ambientais. Na caldeira de recuperação, optou-se por manter o *pinch point* acima de 10 °C e o *approach* foi estabelecido em 7 °C. Uma perda de pressão de 0,2 bar foi considerada na câmara de combustão.

Além das eficiências do ciclo a vapor, é igualmente importante calcular as eficiências do ciclo combinado com turbina a gás, a fim de comparar resultados e avaliar a viabilidade técnica da proposta. A eficiência líquida do sistema de potência a gás η_{TGL} é calculada conforme a Eq. 4

$$\eta_{TGL} = \frac{\dot{W}_{TGL}}{\dot{Q}_{inCC}}, \quad (4)$$

onde \dot{W}_{TGL} é a potência líquida do sistema de potência a gás (diferença entre a potência elétrica entregue pelo gerador acionado pela turbina a gás e a potência consumida pelo compressor que alimenta a câmara de combustão com ar) e \dot{Q}_{inCC} representa o calor de entrada na câmara de combustão, devido a combustão dos gases siderúrgicos com o ar. A eficiência do sistema de potência do ciclo combinado η_{PLCC} é dada pela Eq. 5

$$\eta_{PLCC} = \frac{\dot{W}_{PL} + \dot{W}_{TGL}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}}. \quad (5)$$

A eficiência líquida do ciclo combinado com cogeração é representada pela Eq. 6

$$\eta_{CoL} = \frac{\dot{W}_{PL} + \dot{W}_{TGL} + \dot{Q}_{util}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}}. \quad (6)$$

Todas essas equações (Eqs. 4 a 6) são definições conceituais de eficiências que podem ser encontradas em qualquer referência.

A partir dos casos apresentados, foi determinado o valor da emissão específica de CO₂ para cada cenário. Inicialmente calculou-se E_{comb} (energia contida nos combustíveis) segundo a Eq. 7

$$E_{comb} = \dot{m}_{comb} PCI_{comb} \cdot 3600 \cdot 0,0036, \quad (7)$$

sendo \dot{m}_{comb} e PCI_{comb} a vazão mássica e o poder calorífico inferior do combustível, respectivamente, já o fator 3.600 corresponde à conversão entre segundos e horas (3.600 s·h⁻¹) e o fator 0,0036 corresponde à conversão de MWh para TJ (1 MWh = 3,6 GJ = 0,0036 TJ). A Eq. 7 vem da definição conceitual de energia do combustível e pode ser encontrada em qualquer referência. Em continuidade, para obter a emissão específica E_{CO_2} , aplicaram-se as Eqs. 8 e 9

$$E_{CO_2} = E_{comb} (FE), \quad (8)$$

$$FT = \frac{\sum E_{CO_2}}{G}, \quad (9)$$

onde FE representa o fator de emissão de CO₂ associado a cada combustível, G corresponde à potência gerada pela usina e FT é o fator de emissão de CO₂ total, englobando todos os combustíveis envolvidos. Segundo Magalhães et al. (2010), o fator de emissão de CO₂ para o COG e o BFG são 43.969,70 e 27.517,71 kgCO₂/TJ, respectivamente.

3 Resultados e discussão

3.1 Sistema de cogeração atual

Após a montagem dos componentes no *software* IPSEpro, e levando em conta todos os parâmetros de entrada, fluidos de trabalho e considerações estabelecidas, são apresentados os resultados da simulação da central de cogeração a vapor atual, definida aqui como sendo o caso 0.

Para a vazão de gases de 71 kg/s, valor encontrado por meio da simulação, a caldeira apresentou 203,14 MW de calor de entrada e eficiência de 89,61%. A potência líquida gerada na turbina a vapor foi de 66,56 MW, sendo 35 MW destinados ao gerador elétrico e 31,56 MW ao soprador de alto-forno. As eficiências bruta e líquida do sistema de potência foram de 29,76% e 29,23%, enquanto a eficiência do ciclo a vapor foi de 32,18%. O calor útil recuperado no processo foi de 10,39 MW, elevando as eficiências bruta e líquida da cogeração para 34,41% e 33,88%. Esses resultados estão de acordo com valores típicos para ciclos a vapor na faixa de 30% a 40% de eficiência.

3.2 Proposta para repotenciação com ciclo combinado

Neste trabalho foram avaliadas duas opções para o ciclo combinado, sendo o caso 1 considerando um compressor para a compressão dos gases utilizados e o caso 2 sem o uso desse compressor.

Para a simulação do caso 1, vazão mássica de gases siderúrgicos foi de 130 kg/s de BFG e 1,50 kg/s de COG, o que corresponde a 398,99 MW de disponibilidade energética para uma temperatura de exaustão de 615 °C. Os compressores consomem 48,92 MW (gases siderúrgicos) e 113,08 MW (ar atmosférico), enquanto a turbina a gás produz 282,50 MW, resultando em uma potência líquida de 120,54 MW. A potência elétrica foi de 115,76 MW, com eficiência global de 26,66%, reduzida pelo consumo do compressor de gases siderúrgicos (representa 17% da potência da turbina). Portanto, com a adição da turbina a gás, o sistema em ciclo combinado passou a ter capacidade instalada de 182,32 MW. A eficiência bruta do sistema de potência atingiu 45,70%, enquanto a eficiência líquida, 45,40%. No ciclo combinado com cogeração, as eficiências bruta e líquida alcançaram 48,30% e 48,00%, respectivamente, representando um aumento de 2,60% em relação ao sistema de potência.

Para o caso 2, as vazões mássicas foram ajustadas para 150 kg/s de BFG e 1,60 kg/s de COG, de modo a manter a temperatura dos gases de exaustão próxima de 615 °C, como no caso 1, além de aproximar as vazões mássicas de saída dos gases nos dois cenários analisados. Com a alteração das vazões, a disponibilidade energética na câmara de combustão foi de 461,26 MW. A turbina a gás consumiu 104,74 MW no compressor de ar e produziu 283,8 MW, resultando em potência mecânica líquida de 178,56 MW. Já a potência elétrica atingiu 171,49 MW, resultando em uma eficiência da turbina a gás de 38,71%, superior à do caso 1, devido à eliminação do consumo elevado do compressor dos gases siderúrgicos. Por fim, a

capacidade instalada alcançou 238,05 MW, com eficiências bruta e líquida do sistema de potência de 51,75% e 51,50%, respectivamente. Considerando a cogeração, as eficiências foram de 54,01% (bruta) e 53,76% (líquida), representando um aumento de 2,26%. A Figura 3 traz um comparativo entre todas as eficiências brutas e líquidas para os três casos.

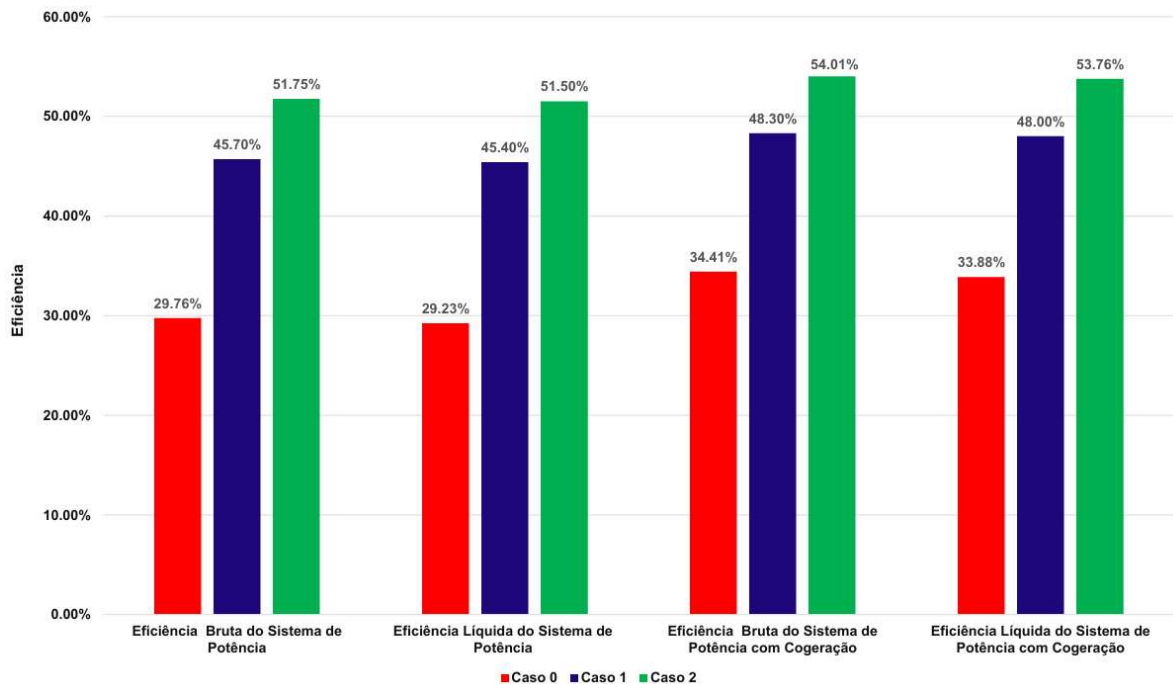


Figura 3. Comparativo entre as eficiências brutas e líquidas dos três casos de estudo.

A repotenciação para o ciclo combinado, com a adição da turbina a gás, elevou significativamente as eficiências do sistema em relação ao caso base (ciclo a vapor). No caso 1, em comparação com o sistema original (caso 0), a eficiência bruta foi 15,94% superior (um aumento de 53,56%) e a líquida foi 16,17% maior (ou seja, uma elevação de 55,31%). No caso 2 os ganhos foram ainda maiores: 21,99% (73,89%) na bruta e 22,27% (76,18%) na líquida. Para a cogeração, os acréscimos foram de 13,89% e 15,12% no caso 1, e de 19,6% e 19,88% no caso 2 (bruta e líquida, respectivamente). Esses ganhos ocorreram com maior consumo de BFG e COG, aumentando a disponibilidade energética do sistema.

Em relação ao aspecto ambiental, foram calculadas as emissões específicas de CO₂ para cada caso de cogeração utilizando as Eqs. 7, 8 e 9. No caso 0, a emissão específica obtida foi 697,89 kgCO₂/MWh. Nos casos 1 e 2, que apresentam aumento da potência instalada e elevação da eficiência em relação ao caso 0, as emissões específicas reduziram-se para 464,43 kgCO₂/MWh e 361,35 kgCO₂/MWh, respectivamente. Esses resultados indicam que o incremento da eficiência da planta correlaciona-se com a diminuição da emissão específica de CO₂ por unidade de energia elétrica gerada.

4 Conclusão

Este estudo demonstrou que o uso de ciclos combinados na indústria siderúrgica pode representar uma alternativa viável, tecnicamente, para o melhor aproveitamento de gases residuais, contribuindo para a transição energética e a descarbonização do setor. A modelagem da UTE-1, originalmente com 68 MW e eficiência líquida de 33,48%, mostrou que a repotenciação por meio da adição de uma turbina a gás pode elevar significativamente o desempenho do sistema.

No caso com compressão dos gases siderúrgicos, a potência atingiu 182,32 MW com eficiência líquida de cogeração de 48,00%, enquanto, no caso sem compressor, obteve-se 238,05 MW e eficiência de 53,76%. Os resultados, obtidos com o *software* IPSEpro, confirmam a viabilidade termodinâmica da repotenciação com gases siderúrgicos e evidenciam o potencial de incremento da eficiência do sistema, ao mesmo tempo em que reforçam o papel dessa solução para a redução de emissões específicas, ao aumentar a eficiência no aproveitamento dos gases siderúrgicos, o que já reduz as emissões específicas de CO₂.

A avaliação ambiental, baseada no fator de emissão dos gases siderúrgicos, mostrou redução das emissões específicas em aproximadamente 33,4% para o caso 1 e 48,2% para o caso 2, em comparação com o caso de referência. Porém, considerando que, o ciclo combinado vai precisar usar o compressor de

gases siderúrgicos, o que reduz muito a eficiência, surge uma oportunidade para futuros estudos para analisar um ciclo a vapor com caldeira supercrítica, que pode alcançar a mesma eficiência, ou próxima, mas menos disruptiva que um ciclo combinado.

Por fim, destaca-se a importância de estudos futuros voltados à aplicação em outras unidades termelétricas, ao uso ciclos combinados com caldeiras de recuperação de múltiplos níveis de pressão, bem como simulação usando turbinas a gás comerciais, com análise de viabilidade econômica das propostas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio com a pesquisa e a SimTech pela licença com o *software* IPSEpro.

Referências bibliográficas

- ArcelorMittal (2022) *Gestão de energia e mudanças climáticas*. [online] <https://brasil.arcelormittal.com/sustentabilidade/meio-ambiente/arcelormittal-tubarao/gestao-energia-mudancas-climaticas> (Accessed: September 30, 2025).
- Belisario, IC (2012) *Análise termoeconômica de uma central de cogeração de uma indústria siderúrgica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Donatelli, JLM (1993) *Análise termodinâmica aplicada à central termoelétrica da cia siderúrgica de tubarão-cst*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- EPE (2022) *Balanço energético nacional – BEN*. [online] <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf> (Accessed: September 30, 2025).
- Ferreira, EL (2015) *Análise do comportamento da combustão do gás do alto forno-BFG em uma câmara de combustão de turbina a gás*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- IEA (2020) *Energy technology perspectives 2020 - special report on carbon capture utilisation and storage: CCUS in clean energy transitions*, [e-journal] OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/208b66f4-en>.
- Governo do Estado do Espírito Santo (2022) *Plano estadual de descarbonização e neutralização de gases de efeito estufa*, [online] [https://seama.es.gov.br/Media/Seama/Documentos/Plano_de_Neutraliza%C3%A7%C3%A3o_das_Emiss%C3%B5es_de_GEE_do_Esp%C3%ADrito_Santo_-_final%20\(1\).pdf](https://seama.es.gov.br/Media/Seama/Documentos/Plano_de_Neutraliza%C3%A7%C3%A3o_das_Emiss%C3%B5es_de_GEE_do_Esp%C3%ADrito_Santo_-_final%20(1).pdf) (Accessed: September 30, 2025).
- Magalhães, LC, Junior, WV, Silva, RJ, Pedrini, RH, Perdigão, LP, Carvalho, LT (2010) ‘Controle e monitoramento das emissões de CO₂ nas áreas dos altos-fornos, sinterização, coqueria e energia da ArcelorMittal Tubarão’, 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 11º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, [e-journal] p. 503-515. <http://doi.org/10.5151/2594-357X-17499>.
- Moran, MJ, Shapiro, HN, Boettner, DD and Bailey, MB (2018) *Fundamentals of engineering thermodynamics*, 9th edn. Wiley.
- Shahnazari, MR and Abbassi, A (2003) *Repowering an Existing Power Generating Plant*, in 2003 International Joint Power Generation Conference. ASMEDC, [e-journal] pp. 349–352. <https://doi.org/10.1115/IJPGC2003-40006>.
- Silva, MM (2004) *Repotenciamento em sistemas de geração de potência na indústria siderúrgica utilizando Análise Termoeconômica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SimTech (2025) *The process simulation environment IPSEpro*, [online] <https://simtechnology.com/ipsepro/process-simulation-and-heat-balance-software> (Accessed: September 30, 2025).
- UNFCCC (2022) *Cop27 - Sharm el-Sheikh climate change conference*, [online] <https://unfccc.int/cop27> (Accessed: September 30, 2025).