

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TECNOLÓGICO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA GELADA RECUPERANDO CALOR RESIDUAL PARA REPOTENCIAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE GRANDE PORTE

Bruno Muniz de Freitas Miotto, brunomiotto77@hotmail.com
José Joaquim Conceição Soares Santos, jjcsantos@yahoo.com.br
Lucas Sagrilo Rocha, lucassagrilo@hotmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória-ES, Brasil

Resumo. Para descarbonizar a matriz elétrica, a utilização do gás natural como combustível de transição é uma solução de curto prazo. Porém, a sua utilização sem captura de carbono não é viável a longo prazo. Entretanto, o alto custo e a penalidade desta solução torna necessário a repotenciação e eficiência das termelétricas, seja pela instalação de sistemas térmicos para recuperação de calor residual e condicionamento do ar de admissão dos motores de combustão interna (MCI), ou para geração elétrica adicional. Portanto, considerando a modularidade dessas plantas e a possibilidade de utilizar um único motor para condicionar o ar de diversos outros, o objetivo deste trabalho é avaliar a capacidade máxima de produção de água gelada pela recuperação de calor residual de um MCI utilizando chillers por absorção ou por compressão combinado a um Ciclo Rankine Orgânico (ORC), tendo a Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo (UTE LORM), em Linhares, Espírito Santo, como estudo de caso. Dados dos desempenhos dos equipamentos comerciais foram utilizados, combinados ao balanço de energia do motor proveniente do fabricante e de simulações. Analisando quatro sistemas térmicos diferentes, a configuração mais vantajosa utiliza dois chillers por absorção e ORC combinado a um chiller por compressão, configuração esta de sistema térmico que, acoplado a um único motor operando a 10,2 MW de potência de eixo, produz 2604 TR de água gelada, o suficiente para condicionar o ar de admissão de 14 motores similares, possibilitando o aumento da potência produzida, além de aumentar o calor rejeitado a ser recuperado.

Palavras-chave: Sistemas Térmicos. Motores de Combustão Interna. Recuperação de Calor Residual. *Chiller* por Absorção. Ciclo Rankine Orgânico.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o governo tem buscado mais avanços significativos em políticas e ações para Transição Energética e Descarbonização. Um marco importante foi a aprovação da Política Nacional de Transição Energética (PNTE) em 2024, que estabelece um plano estratégico para o país atingir uma “economia verde” por meio de investimentos em energia elétrica limpa e renovável, combustíveis sustentáveis de baixo carbono e mineração sustentável (MME, 2024).

A nível estadual, o governo do Espírito Santo criou o Plano de Descarbonização e Neutralização de Gases de Efeito Estufa (PDNEGES), em compromisso com as campanhas “Race to Zero” e “Race to Resilience”, definindo estratégias e ações para o cumprimento das metas de minimização do impacto ambiental até 2050. O plano foi elaborado (SEAMA, 2022), passou por consulta pública (SEAMA, 2023), aprovação (CIRILO, 2024) e já está em execução (FILHO, 2024). A necessidade de ações ambientais no estado é resultado da predominância de fontes não renováveis utilizadas principalmente pelos setores de Energia e Indústria, sendo responsáveis por mais de 50% das emissões líquidas de CO₂.

Considerando as diretrizes para transição energética e redução dos impactos ambientais do setor de energia, uma das possíveis medidas mais diretas para a redução da emissão de CO₂ geradas pela queima de combustíveis são os sistemas de Captura, Utilização e Sequestro de Carbono (CCUS, sigla em inglês de *Carbon Capture, Utilization and Storage*). As tecnologias CCUS compreendem uma série de processos térmicos que permitem capturar, transportar e sequestrar o dióxido de carbono (CO₂) emitido nas atividades industriais e na geração de eletricidade (CNI, 2024).

Segundo o Governo do estado do Espírito Santo (2023), apesar do uso de gás natural como combustível de transição ser considerado uma solução a curto e médio prazo, sua utilização sem métodos de CCUS eficientes não deve ser considerada uma opção viável a longo prazo. Portanto, o investimento em projetos para o desenvolvimento e aplicação de projetos de CCUS é importante para que usinas termelétricas a gás natural sejam competitivas futuramente, resultando em processos de geração de energia com ausência de emissões de gases do efeito estufa (GEE).

O principal empecilho para a aplicação dos sistemas CCUS são os custos de aquisição e operação. Segundo d’Amore e Bezzo (2017), os custos para um sistema destes, na Europa, foram estimados entre 27 a 38 €/tCO₂, o que pode servir como uma estimativa para a precificação do carbono, de modo a compensar o investimento. Segundo o *World Bank Group* (WORLD BANK GROUP, 2024), atualmente existem 36 instrumentos governamentais de precificação de carbono no mundo, com o maior preço no sistema europeu, de aproximadamente 61,30 USD/t CO₂.

Além disso, as tecnologias de captura de carbono podem causar perdas significativas de eficiência em sistemas de geração de potência, sendo previstas perdas variando entre 7% e 9% (BRICKETT; MUNSON; LITYNSKI, 2020; ROGELJ et al., 2018). Portanto, para mitigar as penalidades causadas pela aplicação das tecnologias de captura de carbono em sistemas de energia e possibilitar o retorno do investimento feito para a aquisição do sistema, dois processos podem ser considerados: repotenciação e efficientização das plantas termelétricas.

Muitas usinas termelétricas brasileiras foram planejadas somente para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico nacional, sendo projetadas com foco em simplicidade e baixo custo inicial em detrimento de sua eficiência (MORAWSKI et al., 2017). Porém, com a diminuição do nível dos reservatórios das hidrelétricas (FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO, 2019), essas usinas começaram a operar continuamente ao longo do ano, como ocorreu em 2021 (EPE, 2022). Consequentemente, com o aumento do tempo de operação, tornou-se importante melhorar o desempenho dessas plantas.

Considerando os investimentos para repotenciação de usinas termelétricas, destaca-se o resfriamento e desumidificação do ar de admissão para motores de combustão interna (MCI). O resfriamento do ar de admissão aumenta a massa específica do ar de combustão no motor, permitindo maior quantidade de ar e combustível nos cilindros e consequentemente possibilitando o aumento de potência de eixo produzida (CASH, 2015).

A norma ISO 15550:2016 (ISO Central Secretary, 2016) apresenta as correções necessárias para a potência de eixo produzida de motores que operam em condições diferentes de temperatura de admissão. Porém, o resfriamento do ar de admissão de 25 para 10°C de um motor com 9MW de potência de eixo nominal causaria um aumento na potência na ordem de 73kW segundo a norma, entretanto simulações utilizando o software GT-Power mostraram que esse aumento poderia teoricamente chegar a até 1.5MW de potência (MIOTTO, 2021).

Dentre as várias tecnologias disponíveis para a repotenciação de um motor, o *chiller* por absorção pode ser utilizado para produzir água gelada, capaz de resfriar e desumidificar o ar de admissão do MCI, aumentando a eficiência e a potência produzida (CHUN et al., 2018). A utilização de *chiller* por compressão também pode ser feita para reduzir a complexidade da planta, utilizando potência diretamente ao invés de recuperar calor para acionar um *chiller* por absorção.

Além disso, outra alternativa viável de repotenciação e efficientização é a recuperação de calor residual ou WHR (do inglês *Waste Heat Recovery*), que consiste em utilizar o calor que normalmente é rejeitado pelo motor por um sistema térmico, pelos gases de exaustão ou pela água de resfriamento, para transformá-lo em uma forma útil de energia. Este calor que seria rejeitado pode ser utilizado em um ciclo de repotenciação (Rankine convencional, Rankine orgânico, Kalina) ou por um *chiller* por absorção, produzindo água gelada (MORAWSKI et al., 2017).

Usinas termelétricas a motor de combustão interna de grande porte tendem a ser modulares, ou seja, possuem várias unidades geradoras para possibilitar a produção de potência em diferentes patamares alterando apenas a quantidade de motores em operação, sem detrimento a eficiência da usina por operar em carga parcial. A modularidade dessas usinas permite a utilização de equipamentos (*chillers* e ORC's) de maior porte, combinando a recuperação de calor de um conjunto de motores ao invés de um único motor.

Considerando as diversas rotas tecnológicas disponíveis, um sistema que contenha captura de carbono combinada a repotenciação e recuperação de calor residual de um conjunto de motores pode ser desenvolvido em diversas configurações diferentes. Como a água gelada produzida pelo sistema térmico é utilizada somente para o condicionamento do ar de admissão, é importante identificar a importância da economia de escala neste problema, podendo ter um único *chiller* para resfriar o ar de vários motores e recuperar calor de vários motores.

Adicionalmente, o calor recuperado em apenas um motor é o suficiente para acionar um *chiller* por absorção capaz de produzir água para condicionar o ar de admissão de diversos motores de mesmo porte, permitindo que a recuperação de calor residual destes outros seja destinada a geração de energia elétrica por meio de ORC's ou outras tecnologias.

Considerando a modularidade dessas usinas e a possibilidade de utilizar diferentes tecnologias de recuperação de calor residual, surge a necessidade de avaliar a capacidade máxima de produção de água gelada por recuperação de calor residual de um motor utilizando *chillers*, de modo a determinar quantos motores podem ter o ar de admissão condicionado por meio da recuperação de calor de um único motor.

Logo, o objetivo deste trabalho é determinar a capacidade máxima de produção de água gelada de *chillers* comerciais, por absorção ou por compressão combinado a um Ciclo Rankine Orgânico (ORC), recuperando calor residual de um único motor de combustão interna de grande porte, tendo a Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo (UTE LORM), localizada em Linhares – ES, como estudo de caso.

2. METODOLOGIA

Primeiramente, é necessário identificar e avaliar as fontes disponíveis de recuperação de calor residual no estudo de caso. Em seguida, é feita uma busca em catálogos comerciais para identificar possíveis equipamentos (*chillers* e ORC's) que possibilitariam a recuperação de calor residual do motor. Posteriormente, as configurações do sistema térmico acoplado ao motor utilizadas na análise são especificadas. Por fim, utilizando dados de equipamentos comercialmente disponíveis, a capacidade máxima de produção de água gelada é definida para cada configuração, possibilitando determinar a quantidade de motores que poderiam ser atendidos para o condicionamento do ar de admissão.

2.1. ESTUDO DE CASO

A UTE LORM foi implantada em dezembro de 2010, em Linhares, no Espírito Santo, com uma potência instalada de 204 MW. A planta possui 24 unidades geradoras de potência, sendo divididas em 4 conjuntos de 6 máquinas. Cada unidade geradora é composta por um motor Wärtsilä modelo W20V34SG, ciclo Otto, 4 tempos, potência de eixo nominal de 8.700 kW, e geradores trifásicos síncronos Cummins AvK modelo DIG 167g/10, com cada grupo gerador produzindo aproximadamente 8,5 MW de potência elétrica.

Para definir a dimensão dos equipamentos a serem utilizados no sistema térmico de recuperação de calor, deve-se determinar a quantidade de calor rejeitado pelos gases de exaustão e pela água de resfriamento do motor. Considerando que o condicionamento do ar de admissão do motor permite o aumento da potência além da nominal, o calor rejeitado pela máquina é obtido pela extrapolação do balanço de energia apresentado no catálogo Wärtsilä (2008), apresentado na Tabela 1. O balanço de energia do motor é baseado nas condições de referência definidas na norma ISO 3046-1 (ISO CENTRAL SECRETARY, 2002), exceto para a água de resfriamento considerada a 35°C (WÄRTSILÄ, 2008).

Tabela 1 – Balanço de energia no motor Wärtsilä 20V34SG

Grandeza	Valores			
Carga (%)	100	90	75	50
Brake Mean Effective Pressure, BMEP (bar)	19,96	17,97	14,97	9,98
Potência de eixo (kW)	8700	7830	6525	4350
Óleo lubrificante (kW)	930	900	850	730
Charge Air Cooler (kW)	1890	1520	1080	540
Bloco do motor (kW)	1230	1140	1040	900
Radiação (kW)	280	270	260	250

Fonte: Adaptado de Wärtsilä (2008).

Conforme demonstrado por Miotto (2021), o balanço de energia da Tabela 1 é utilizado para determinar correlações do calor dissipado pelo motor, em % da energia total adicionada, em função da potência de eixo $\dot{W}_{eixo}$. O calor rejeitado para a água de resfriamento é dividido em três parcelas: a rejeitada pelo bloco do motor, a rejeitada pelo óleo lubrificante e a rejeitada pelo resfriamento do ar de combustão no trocador de calor denominado *Charge Air Cooler* (CAC).

Para o calor dissipado para o óleo lubrificante L_{loc} , a correlação é dada pela equação (1). A energia dissipada por radiação e convecção para o ambiente L_{rc} é obtida pela equação (2). A correlação para a energia dissipada no bloco L_{bloco} é representada pela equação (3) e o calor rejeitado no CAC é representado pela equação (4).

$$L_{loc} = -2,27 \cdot 10^{-21} \cdot (\dot{W}_{eixo})^5 + 5,08 \cdot 10^{-17} \cdot (\dot{W}_{eixo})^4 - 3,19 \cdot 10^{-13} \cdot (\dot{W}_{eixo})^3 + 8,38 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

$$L_{rc} = -1,86 \cdot 10^{-21} \cdot (\dot{W}_{eixo})^5 + 3,95 \cdot 10^{-17} \cdot (\dot{W}_{eixo})^4 - 2,28 \cdot 10^{-13} \cdot (\dot{W}_{eixo})^3 + 3,22 \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

$$L_{bloco} = -4,04 \cdot 10^{-21} \cdot (\dot{W}_{eixo})^5 + 8,89 \cdot 10^{-17} \cdot (\dot{W}_{eixo})^4 - 5,27 \cdot 10^{-13} \cdot (\dot{W}_{eixo})^3 + 0,107 \quad (3)$$

$$L_{CAC} = 3,64 \cdot 10^{-21} \cdot (\dot{W}_{eixo})^5 - 7,67 \cdot 10^{-17} \cdot (\dot{W}_{eixo})^4 + 4,99 \cdot 10^{-13} \cdot (\dot{W}_{eixo})^3 + 3,41 \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

A correlação para determinar a eficiência do motor, obtida por meio de simulações no *software* GT-Power (MIOTTO, 2021), é definida pela equação (5), sendo necessária para determinar a quantidade de energia adicionada pelo gás natural $\dot{Q}_{GN}$, conforme equação (6).

$$\eta_{motor} = 2,7692 \cdot 10^{-10} \cdot (\dot{W}_{eixo})^2 - 7,8331 \cdot 10^{-6} \cdot (\dot{W}_{eixo}) + 0,40141 \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{GN} = \frac{\dot{W}_{eixo}}{\eta_{motor}} \quad (6)$$

Assim, a porcentagem da energia adicionada pelo combustível dispersada pelos gases de exaustão L_{gases} pode ser calculada pelo balanço de energia, como demonstrado na equação (7).

$$L_{gases} = 1 - L_{loc} - L_{rc} - L_{bloco} - L_{CAC} - \eta_{motor} \quad (7)$$

Por fim, a energia disponível para recuperação de calor residual na água de resfriamento do motor $\dot{Q}_{rad}$ é definida pela equação (8), enquanto a energia dos gases de exaustão $\dot{Q}_{gases}$ é definida pela equação (9).

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{GN} \cdot (L_{bloco} + L_{CAC} + L_{loc}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{gases} = \dot{Q}_{GN} \cdot (L_{gases}) \quad (9)$$

2.2. SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL

Primeiramente, para selecionar os equipamentos a serem utilizados na análise, foi realizada uma busca com diversos fabricantes para coletar informações de *chillers* e *ORC* em seus catálogos comerciais. Dessa forma, os modelos compatíveis com as condições de operação do MCI deste estudo foram organizados de forma que fosse possível comparar e selecionar o melhor equipamento para cada configuração de sistema. Sagrilo (2022) organizou os dados comerciais desses equipamentos, contendo modelos de *chillers* acionados a gases de exaustão, *chillers* a água quente, *ORC* a gases de exaustão, *ORC* a água quente e *chillers* por compressão de vapor. Para cada uma dessas tecnologias, certos modelos foram selecionados de acordo com o desempenho e com a temperatura de fonte quente necessária para o acionamento.

Devido a temperaturas de operação da água de resfriamento do motor serem aproximadamente 87°C, a maioria dos *chillers* selecionados operaria com *derating*, com exceção do modelo *2AA Series* (WORLD ENERGY, 2025), capaz de aproveitar calor residual de água quente com temperatura de 70°C.

Para aproveitamento dos gases de exaustão a aproximadamente 390°C, os modelos selecionados de *chiller* por absorção são o da série 3G (THERMAX, 2025), com a tecnologia triplo efeito e COP (*coefficient of performance*) de 1,8, e a série 2G (THERMAX, 2025), com a tecnologia duplo efeito (COP=1,4). Adicionalmente, o *chiller* série WC2H (LG, 2025) também pode ser utilizado para aproveitar calor dos gases de exaustão, com COP de 0,72. Esses três modelos necessitam de um fluido intermediário, já que não são projetados para acionamento direto com gases de exaustão, sendo utilizada água quente pressurizada para todos estes equipamentos.

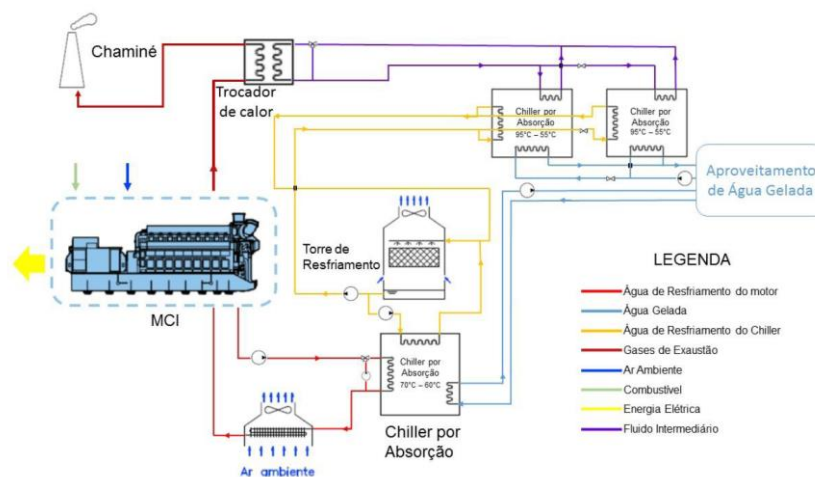
Dentre os modelos de *ORC* pesquisados, o fabricante ENERTIME (2023) apresenta equipamentos com 25% de eficiência e acionamento por recuperação direta de calor dos gases de exaustão. Se utilizado em conjunto um *chiller* por compressão de vapor do fabricante TRANE (2025) da série CENTRAVAC CVHS (COP = 6,4), o *COSP* (*coefficient of system performance*) é 1,6. Considerando que a faixa de temperatura do *ORC* (250°C – 150°C) é maior do que a combinação dos dois *chillers* de alta temperatura da Thermax combinados, é possível que a utilização do conjunto *ORC* + *chiller* por compressão seja uma configuração competitiva economicamente.

2.3. CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA TÉRMICO

Com a seleção dos equipamentos, é possível definir as configurações dos sistemas térmicos, levando em consideração a baixa interferência no sistema para evitar problemas operacionais. Para a estimativa de desempenho dos sistemas, foram consideradas a compatibilidade da temperatura da fonte quente e a temperatura exigida pela máquina, o desempenho da máquina por meio do COP e a capacidade de refrigeração, realizando balanço de energia para estimar o resultado.

A Configuração 1 do sistema térmico utiliza um *chiller* por absorção acionado a água quente para aproveitar o calor da água de resfriamento do motor (série 2AA da fabricante World Energy) e dois *chillers* por absorção para aproveitamento do calor rejeitado pelos gases. As máquinas utilizadas para recuperar calor dos gases são da série WC2H, fabricada pela LG. Um esquema representativo da Configuração 1 do sistema térmico é apresentado na Figura 1.

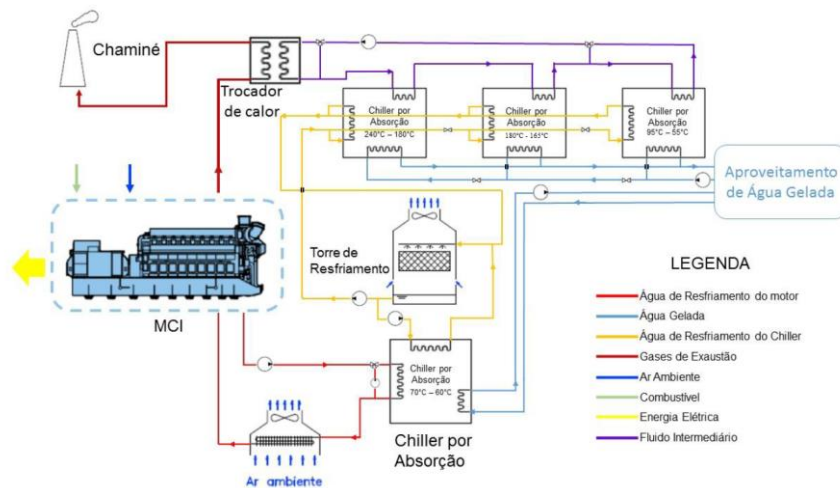
Figura 1 – Esquema representativo da Configuração 1 do sistema térmico



Fonte: Sagrilo (2022).

A Configuração 2 do sistema térmico contém quatro *chillers* por absorção, sendo três para recuperar calor dos gases de exaustão e outro acionado a água quente para recuperar o calor da água de resfriamento (mesmo modelo utilizado na Configuração 1). Três modelos distintos são utilizados para reaproveitar a energia dos gases, devido às diferentes temperaturas de fluido intermediário. O modelo de *chiller* 3G Series da THERMAX opera com temperatura do fluido de trabalho entre 240°C e 180°C. O outro *chiller* utilizado é da série 2G do mesmo fabricante, recebendo o fluido de trabalho a 180°C e retornando com 165°C. O último *chiller* é do fabricante LG, série WC2H, recebendo o fluido intermediário a 95°C e retornando a 55°C, o mesmo utilizado na Configuração 1. Um esquema representativo da Configuração 2 do sistema térmico é apresentado na Figura 2.

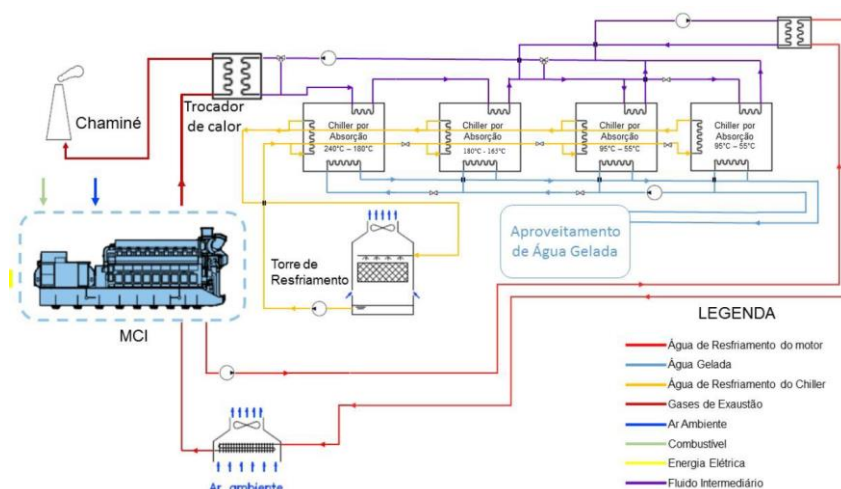
Figura 2 – Esquema representativo da Configuração 2 do sistema térmico



Fonte: Adaptado de Sagrilo (2022).

A Configuração 3 é composta de três *chillers* por absorção de vapor, instalados em série, similar ao Sistema 02. No entanto, não há mais um *chiller* por absorção no sistema de resfriamento do motor. A água de resfriamento do motor é resfriada pelo fluido intermediário dos *chillers* em um trocador de calor, já que o modelo WC2H da fabricante LG utiliza o fluido quente até uma temperatura de 55°C. Com este recurso, o calor rejeitado do sistema de resfriamento do motor, antes aproveitado por um *chiller* com *COP* de 0,412, agora é utilizado por um equipamento mais eficiente com *COP* de 0,72. Assim, considera-se que o modelo WC2H da LG, com saída de fluido intermediário a 55°C, consegue resfriar a água do radiador a 60°C. Para que este arranjo seja possível, são utilizados dois *chillers* do fabricante LG. Um esquema representativo da Configuração 3 do sistema térmico é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema representativo da Configuração 3 do sistema térmico

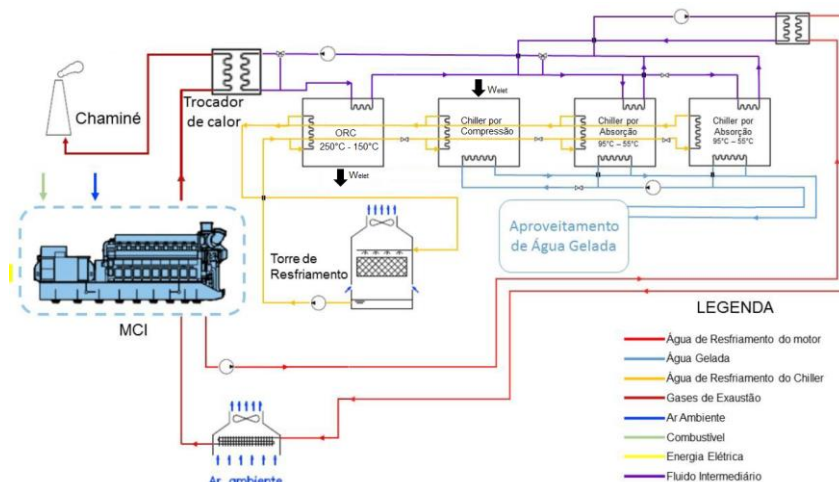


Fonte: Adaptado de Sagrilo (2022).

A Configuração 4 utiliza um ORC, um *chiller* por compressão e dois *chillers* por absorção de vapor. O calor dos gases de exaustão é recuperado pelo circuito de fluido intermediário, com temperatura entre 250°C e 55°C. Como a temperatura mínima é a mesma que todas as outras configurações, o calor recuperado também é o mesmo. No entanto, pela diferença

entre as variações de temperatura, a vazão do fluido é menor. O calor recuperado é utilizado primeiramente em um ORC da fabricante Enertime, produzindo potência elétrica, que pode ser utilizada no *chiller* por compressão modelo CENTRAVAC CVHS da fabricante Trane, ou pode ser vendida diretamente. O restante da energia recuperada é aproveitada em dois *chillers* do modelo WC2H da LG. Similar à Configuração 3, não há mais um *chiller* por absorção no sistema de resfriamento do motor. Um esquema representativo da Configuração 4 do sistema é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema representativo da Configuração 4 do sistema térmico



Fonte: Produção do próprio autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando as Equações de (1) a (9) e adotando dados de operação do motor segundo Miotto (2021), os parâmetros de operação e a energia disponível para recuperação do motor podem ser definidos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de operação e balanço de energia no motor Wärtsilä 20V34SG

Grandeza	Valores
Potência de eixo (kW)	100
Eficiência (%)	45,25
Vazão mássica dos gases de exaustão (kg/s)	16,62
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	390
Vazão mássica da água de resfriamento do motor (kg/s)	23,77
Temp. da água resfriamento do motor (°C)	87,44
Calor rejeitado no radiador (kW)	5512
Calor rejeitado pelos gases de exaustão (kW)	6573

Fonte: Adaptado de Sagrilo (2022).

Assim, com as condições de operação definidas, pode-se determinar a quantidade de água gelada produzida por cada uma das configurações do sistema térmico, utilizando dados dos modelos comerciais de *chiller* e ORC.

Na Configuração 1, o modelo 2AA do fabricante *World Energy* é capaz de resfriar a água do motor até 60°C (temperatura de saída da fonte quente), aproveitando aproximadamente 2746 kW da energia contida na água de resfriamento do motor. Considerando o COP de 0,412 deste modelo, a produção de água gelada é de 1131 kW, aproximadamente 322 TR.

Para recuperação de calor residual dos gases de exaustão, é utilizado o modelo WC2H, fabricado pela LG, com temperatura do fluido intermediário variando de 90 a 55°C, o que limita o aproveitamento da energia dos gases. Assim, utilizando dois *chillers*, é possível aproveitar 6060 kW, com um COP de 0,72, o que resulta em 1241 TR de água gelada.

Por fim, combinando os *chillers* da Configuração 1, o sistema térmico produz 1563 TR (5596 kW) de água gelada, recuperando 8806 kW de energia do motor, representando um COSP (*coefficient of system performance*) de 0,635.

O aproveitamento do calor residual da água de resfriamento na Configuração 2 é similar à primeira configuração, portanto aproximadamente 2746 kW da energia é recuperada para produzir 1131 kW de água gelada, aproximadamente 322 TR, com um COP de 0,412.

No entanto, para recuperação de calor residual dos gases de exaustão, são utilizados três modelos diferentes de *chiller*, com temperatura do fluido intermediário variando de 240° a 55°C. Logo, como a temperatura mínima do fluido é a mesma da Configuração 1 (limitado pelo modelo WC2H, fabricado pela LG), a mesma quantidade de energia é recuperada para

os dois sistemas, independente da quantidade de equipamentos. Assim, com os três *chillers*, aproveita-se aproximadamente 6060 kW de energia dos gases de exaustão.

Primeiramente, pelo balanço de energia no trocador de calor de recuperação, considerando que a temperatura dos gases de exaustão varia de 390°C a 60°C e o fluido intermediário varia de 240°C a 55°C, é possível determinar a vazão do fluido intermediário (7,54 kg/s de água quente). Consequentemente, o calor aproveitado no primeiro *chiller*, com variação da temperatura da fonte quente de 240°C a 180°C, é de 2055 kW, que considerando o COP do equipamento de 1,8, produz 1052 TR de água gelada. Em seguida, com 15°C de variação de temperatura da fonte quente no segundo *chiller*, o calor aproveitado é de aproximadamente 495 kW, produzindo 197 TR de água gelada. Por fim, o restante da energia recuperada (3510 kW) é aproveitado no *chiller* modelo LG série WC2H, produzindo 710 TR de água gelada.

Assim, utilizando a Configuração 2, a recuperação de calor residual dos gases de exaustão e da água de resfriamento do motor permite produzir 2281 TR de água gelada. Considerando que foram recuperados 8806 kW de calor residual, o COSP da Configuração 2 é de 0,91.

O sistema térmico com a Configuração 3 apresenta quatro *chillers* para a recuperação de calor residual do motor, combinando as duas fontes (gases de exaustão e água de resfriamento) em um único circuito de fluido intermediário. No entanto, como a variação de temperatura do fluido intermediário é de 240° a 55°C, a energia recuperada dos gases é a mesma que as outras configurações (6060 kW). Ainda, como a adição de calor feita pela água de resfriamento ocorre a temperaturas menores do que 90°C, os *chillers* que operam a temperaturas mais altas não são afetados. Portanto, a produção de água gelada dos *chillers* das séries 3G e 2G, da fabricante Thermax, é a mesma que na Configuração 2 (1052 TR e 197 TR, respectivamente).

A Configuração 3 difere das anteriores em relação ao método de recuperação de calor da água de resfriamento do motor. Como a temperatura do fluido intermediário é de 55°C, considera-se que a temperatura de saída da água de resfriamento do trocador é de 60°C, de modo que essa temperatura é a mesma para todas as configurações. Portanto, como o calor aproveitado é o mesmo em todas as configurações, ao utilizar um *chiller* mais eficiente (COP de 0,72 ao invés do COP de 0,412), a Configuração 3 produz mais água gelada do que as demais. A energia utilizada pelos *chillers* da série WC2H é a soma entre o restante da energia dos gases (3510 kW) e a energia recuperada da água de resfriamento (2746 kW), totalizando 6256 kW. Assim, considerando o COP de 0,712, são produzidos 2515 TR de água gelada no sistema térmico da Configuração 3. Por fim, o COSP da Configuração 3 é de 1.

A Configuração 4 do sistema térmico recupera calor das duas fontes utilizando dois *chillers* por absorção e um ORC. Similar às outras configurações, a energia recuperada dos gases é a mesma que as outras duas configurações (6060 kW), já que a temperatura mínima do fluido intermediário é 55°C. Como a temperatura máxima deste fluido é 250°C (como requerido pelo ORC), a vazão no circuito intermediário é menor do que nas outras análises. O ORC aproveita aproximadamente 3204 kW do calor para produzir 801 kW de potência elétrica. A energia produzida pelo ORC pode ser utilizada completamente por um *chiller* por compressão (COP=6,4), produzindo 5126,4 kW de água gelada (1457 TR). O restante da energia recuperada das duas fontes é aproveitada por *chillers* por absorção a série WC2H (COP de 0,712), produzindo aproximadamente 1147 TR de água gelada.

A quantidade de água gelada produzida por cada equipamento das quatro configurações do sistema térmico, utilizando dados dos modelos comerciais de *chiller* e ORC, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – COSP e quantidade de água gelada produzida pelos equipamentos de cada configuração

<i>Chillers</i>	Água gelada produzida (TR)			
	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4
Série 2AA (água de resfriamento)	322	322	-	-
Série WC2H (gases de exaustão)	1241	710	1266	1147
Série 3G (gases de exaustão)	-	1052	1052	-
Série 2G (gases de exaustão)	-	197	197	-
Modelo CVHS (compressão)	-	-	-	1457
Total	1563	2281	2515	2604
COSP (<i>coefficient of system performance</i>)	0,635	0,91	1	1,04

Fonte: Produção do próprio autor.

Comparando as quatro alternativas, nota-se que a Configuração 4, além de produzir mais água gelada (67% a mais do que a Configuração 1, 14% a mais do que a Configuração 2 e 3,5% a mais do que a Configuração 3), também é mais eficiente do que as demais, recuperando a mesma quantidade de calor residual.

Assim, considera-se que, utilizando somente equipamentos comerciais, é possível produzir 2604 TR de água gelada a partir da recuperação de calor residual de um motor de combustão interna de grande porte.

Segundo Miotto (2021), analisando simulações do motor Wäertsilä 20V34SG a 10,2 MW sujeito a condições ambientais de um histórico climático local, um *chiller* por absorção de 185 TR é capaz de resfriar o ar de admissão do motor até 12,5°C saturado em 99% dos casos, o suficiente para aumentar a potência de eixo do mesmo até 10,2 MW.

Logo, a recuperação de calor residual de um único motor, utilizando o sistema térmico com a Configuração 4, é capaz de produzir 2604 TR, o suficiente para resfriar o ar de admissão de 14 motores similares. Como a UTE LORM possui 24

unidades geradoras, o uso de *chillers* por absorção para recuperação de calor residual de apenas dois motores é o suficiente para resfriar o ar de admissão de todos os motores da usina, sobrando aproximadamente 768 TR de água gelada.

Outra vantagem da Configuração 4 é a recuperação de calor utilizando ORC ao invés de *chiller* por absorção. Assim, caso esta configuração seja utilizada em dois motores, é possível utilizar menos *chillers* por compressão e vender a potência elétrica excedente produzida pelos ORC's, gerando lucro direto para a usina.

Adicionalmente, é importante ressaltar que 185 TR é a capacidade necessária para resfriar o ar de admissão em uma condição ambiente crítica, na qual a água gelada necessária para o condicionamento do ar é maior do que em 99% das horas anuais. Portanto, em 99% do tempo de operação em um ano, no qual o resfriamento do ar de admissão necessita de menos do que 185 TR de água gelada, o sistema térmico com a Configuração 4 pode reduzir o consumo de energia elétrica dos *chillers* por compressão e vender o excedente produzido pelo ORC. Já o sistema térmico projetado como as outras configurações produz somente água gelada utilizando *chillers* por absorção, sendo menos flexível economicamente e diminuindo o retorno monetário do investimento para a empresa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar a capacidade máxima de produção de água gelada recuperando calor residual de um único motor de combustão interna de grande porte, tendo a Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo (UTE LORM) como estudo de caso. Para isso, foram utilizadas dados de desempenho de equipamentos comerciais de diversos fabricantes, sendo desenvolvidas quatro configurações diferentes de sistemas térmicos compostos por *chillers* por absorção, por compressão e Ciclo Rankine Orgânico (ORC).

Para todas as configurações, como a menor temperatura da fonte quente dos *chillers* por absorção utilizados é de 55°C, considera-se que a energia dos gases de exaustão é recuperada, resfriando-o de 390°C a 60°C. Similarmente, a temperatura da água de resfriamento do motor varia de 89,7°C até 60°C. Consequentemente, o calor recuperado dos gases de exaustão é aproximadamente 6060 kW, enquanto no sistema de resfriamento do motor recupera-se 2746 kW, totalizando 8806 kW de calor recuperado em um motor operando a 10,2 MW de potência de eixo.

Na análise dos sistemas térmicos, até mesmo a mais simples Configuração 1 ainda é capaz de produzir água gelada suficiente (1563 TR) para condicionar o ar de admissão de 8 motores, considerando uma condição climática crítica. Assim, independente da configuração utilizada, a modularidade da usina permite que a recuperação de calor residual de poucos motores seja suficiente para condicionar o ar de admissão de toda a planta.

A Configuração 4, mais vantajosa que as demais, utiliza um ORC, um *chiller* por compressão e dois *chillers* por absorção para produzir água gelada suficiente (2604 TR) para condicionar o ar de 14 motores similares. Como a UTE LORM é composta por 24 unidades geradoras, a recuperação de calor de apenas dois motores seria o suficiente para o condicionamento do ar de admissão de todos os motores da planta e, consequentemente, possibilita o aumento da potência produzida.

Além disso, a utilização do conjunto ORC + *chiller* por compressão ao invés de *chillers* por absorção flexibiliza a utilidade do sistema térmico, possibilitando utilizar a potência adicional produzida pelo ORC para acionar o *chiller* ou para ser vendida diretamente, gerando lucro para a empresa. Adicionalmente, segundo Miotto (2021), em aproximadamente 50% do histórico as condições climáticas resultariam em uma quantidade de água gelada necessária 125 TR por motor, totalizando 3000 TR para a planta inteira. Considerando o potencial máximo de produção de água gelada em dois motores, com a Configuração 4, podem ser produzidos 5204 TR de água gelada, 2204 TR a mais do que o necessário. Considerando o COP de 6,4 do *chiller* por compressão, aproximadamente 1,2 MW de potência elétrica produzidos pelo ORC poderiam ser vendidos diretamente ao invés de utilizados para acionar *chillers*. Por não consumir combustível, toda a potência adicional produzida pelo ORC que não é utilizada por *chillers* aumenta a eficiência da planta.

Assim, além da repotenciação resultante do condicionamento do ar de admissão (1,5 MW por motor), ainda é possível produzir potência adicional em ORC's, dependendo da quantidade de água gelada necessária para a condição ambiental no momento. Esse investimento na repotenciação e efficientização da usina termelétrica, além de gerar lucro a curto prazo para a empresa, também pode ser o suficiente para mitigar o alto custo e as penalidades causadas pela instalação de um sistema de captura de carbono que, segundo o Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE, será necessário a longo prazo para que a planta continue operando. Segundo CNI (2024), com as técnicas de CCUS, o CO₂ capturado pode ser combinado com hidrogênio de baixo carbono para criar combustíveis sintéticos (metanação), possibilitando processos circular de geração de energia com remoção líquida de CO₂ da atmosfera.

5. REFERÊNCIAS

BRICKETT, L.; MUNSON, R.; LITYNSKI, J. U.S. DOE/NETL large pilot-scale testing of advanced carbon capture technologies. **Fuel**, 268, 117169, 2020.

CASH, R. **A quantitative investigation of the water condensation inside tubes of compact charge air cooler**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Michigan Technological University, Houghton, Michigan, 2015.

CHUN, A. *et al.* Thermo-economic optimization of absorption chiller superstructures for an internal combustion engine: waste heat recovery and cold-water applications. In: 17TH BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 2018, Águas de Lindóia. **Proceedings** [...]. Águas de Lindóia: ABCM, 2018. p. 1–13.

CIRILO, F. **Descarbonização: plano é aprovado e Casagrande aponta meta para o ES.** 2024. Disponível em: <https://aquinoticias.com/2024/03/descarbonizacao-plano-e-aprovado-e-casagrande-aponta-meta-para-o-es>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CNI. **Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS): experiências internacionais e o potencial brasileiro.** Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2024.

D'AMORE, F.; BEZZO, F. Economic optimisation of European supply chains for CO₂ capture, transport and sequestration. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 65, p. 99–116, 2017.

ENERTIME. **ORC Solutions for Industry.** 2023. Disponível em: https://www.enertime.com/assets/documents/fiche-orc_ind_7-2023_en-1691435487.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022: ano base 2021.** Brasília: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 17 jul. 2024.

FILHO, A. **Fundo bilionário de descarbonização do ES abre opções, mas precisa ser bem direcionado.** 2024. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/colunas/abdo-filho/fundo-bilionario-de-descarbonizacao-do-es-abre-opcoes-mas-precisa-ser-bem-direcionado-1124>. Acesso em: 9 dez. 2024.

FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO. **Situação dos principais reservatórios do Brasil.** 2019. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/index.php/a-questao-energetica/11610-situacao-dosprincipais-reservatorios-do-brasil-27-12-2019>. Acesso em: 5 set. 2025

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do Espírito Santo: Políticas, Diretrizes e Estratégias necessárias para a neutralização das emissões de GEE do ES até 2050.** Vitória: Governo do Estado do Espírito Santo; Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo, 2023.

ISO CENTRAL SECRETARY. **ISO 3046-1:2002** – Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods — Additional requirements for engines for general use. Geneva: ISO, 2002.

ISO CENTRAL SECRETARY. **ISO 15550:2016** – Internal combustion engines — Determination and method for the measurement of engine power — General requirements. Geneva: ISO, 2016.

LG. **Absorption Chiller Direct Fired Type.** 2025. Disponível em: [https://www.lg.com/br/business/download/airsolution/202004_Catalogo_ChillerAbsorcao\[20210429_024814580\].pdf?srlstid=AfmBOorDYXhUm3gL0RfehhKWRcj7701tRvmdLz2rq_LyfEkSphJcIZ46](https://www.lg.com/br/business/download/airsolution/202004_Catalogo_ChillerAbsorcao[20210429_024814580].pdf?srlstid=AfmBOorDYXhUm3gL0RfehhKWRcj7701tRvmdLz2rq_LyfEkSphJcIZ46). Acesso em: 9 set. 2025.

MIOTTO, B. M. F. **Dimensionamento e análise de um sistema experimental para recuperação de calor residual e condicionamento de ar para um motor de combustão interna de grande porte.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

MME. **MME encerra 2024 com avanços estratégicos para o Brasil na transição energética.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-encerra-2024-com-avancos-estrategicos-para-o-brasil-na-transicao-energetica>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MORAWSKI, A. *et al.* Repotenciação da UTE Viana por meio do aproveitamento do calor rejeitado. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2017, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

SAGRILO, L. **Estudo do potencial tecnológico de produção de água gelada recuperando o calor residual de um motor de combustão interna de grande porte a gás natural.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

ROGELJ, J. *et al.* **Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development.** In: IPCC. Global Warming of 1.5°C. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. Cap. 2.

SEAMA. **Fórum Capixaba de Mudanças Climáticas aprova ações e estratégias para construção de Plano Estadual.** 2022. Disponível em: <https://www.es.gov.br/Noticia/forum-capixaba-de-mudancas-climaticas-aprova-acoes-e-estrategias-para-construcao-de-plano-estadual>. Acesso em: 10 jan. 2025.

SEAMA. **Fórum Capixaba de Mudanças Climáticas aprova Plano de Descarbonização**. 2023. Disponível em: <https://www.es.gov.br/Noticia/forum-capixaba-de-mudancas-climaticas-aprova-plano-de-descarbonizacao>. Acesso em: 10 jan. 2025.

THERMAX. **Vapour Absorption Chillers**. 2025. Disponível em: https://documentos.mollier.pt/thermax/thx_catalogue_eng_low.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

TRANE. **Chiller Resfriado a Água CenTraVac**. 2025. Disponível em: <https://www.trane.com.br/commercial/latin-america/br/pt/products-systems/chillers/water-cooled-chillers/centrifugal-liquid-cooled-chillers.html>. Acesso em: 9 set. 2025.

WÄRTSILÄ. **Wärtsilä 34SG Power Plant Product Guide**. Helsinki: Wärtsilä Corporation, 2008.

WORLD BANK GROUP. **State and trends of carbon pricing dashboard**. 2024. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/instrument-detail>. Acesso em: 9 jan. 2025.

WORLD ENERGY. **2AA - Waste Heat Recovery Low Temperature Hot Water Driven Absorption Chiller**. Disponível em: <https://worldenergy.co.kr/en/portfolio-item/2aa-2>. Acesso em: 9 set. 2025.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro e ao Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da ANEEL pelo financiamento do projeto de pesquisa intitulado como “Projeto CRATOS - Avaliação Experimental do Desempenho de Motores de Combustão Interna de Grande Porte em Função do Condicionamento do Ar de Combustão Recuperando Calor Residual”, necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.