

RECUPERAÇÃO E REUSO DE ENERGIA TÉRMICA EM PLANTAS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Wagner Ferreira¹
Andréia Cristina Furtado²

Resumo:

A busca de meios mais sustentáveis do uso de energia tem sido foco de muitos estudos encontrados na literatura. O presente artigo tem como objetivo compreender o cenário geral de produção e uso de energia térmica na indústria ao levantar informações por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre quais métodos de recuperação vêm sendo pesquisados e quais são os benefícios obtidos com o reuso da energia térmica recuperada. Os resultados da RSL demonstram que a energia térmica é utilizada em vários segmentos industriais e é obtida através de processos que podem envolver eletricidade, combustíveis fósseis ou fontes renováveis. Também demonstram que se vem pesquisando métodos como a cogeração de eletricidade e reuso do calor residual na própria planta industrial, e que o reuso da energia residual promove diminuição nas emissões de gases do efeito estufa, redução no uso de energias primárias e diminuição nos custos de produção.

Palavras-chaves: Transferência de calor; processos industriais; eficiência energética; sustentabilidade.

RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN PLANTAS INDUSTRIALES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Resumen:

La búsqueda de formas más sostenibles de uso de la energía ha sido el foco de muchos estudios encontrados en la literatura. Este artículo tiene como objetivo comprender el escenario general de producción y uso de la energía térmica en la industria mediante la recopilación de información a través de una Revisión Sistemática de la Literatura (SLR) sobre qué métodos de recuperación se han investigado y cuáles son los beneficios obtenidos con la reutilización de la energía térmica recuperada. Los resultados de RSL demuestran que la energía térmica se utiliza en varios segmentos industriales y se obtiene a través de procesos que pueden involucrar electricidad, combustibles fósiles o fuentes renovables. También demuestran que se ha investigado en métodos como la cogeneración de electricidad y la reutilización del calor residual en la propia planta industrial, y que la reutilización de la energía residual promueve una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, una reducción del uso de energía primaria y una reducción en los costos de producción de energía.

Palabras clave: Transferencia de calor; procesos industriales; eficiencia energética; sostenibilidad.

¹ Mestrando em Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal da Integração Latino Americana. Graduado em Tecnologia em Manutenção Eletromecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR (2013) e Licenciatura em Química, UTFPR (2021). E-mail: wagner.ferreira@unila.edu.br.

² Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2009). Professora da Universidade Federal da Integração Latino Americana. E-mail: andreia.furtado@unila.edu.br.

THERMAL ENERGY RECOVERY AND REUSE IN INDUSTRIAL PLANTS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract:

The search for more sustainable means of energy use has been the focus of many studies found in the literature. This article aims to understand the general scenario of production and use of thermal energy in the industry by gathering information through a Systematic Literature Review (SLR) on which recovery methods have been researched and what are the benefits obtained with reuse of the thermal energy recovered. The RSL results demonstrate that thermal energy is used in several industrial segments and is obtained through processes that may involve electricity, fossil fuels or renewable sources. They also demonstrate that research has been carried out on methods such as cogeneration of electricity and reuse of residual heat in the industrial plant itself, and that the reuse of residual energy promotes a decrease in greenhouse gas emissions, a reduction in the use of primary energy and a reduction in energy costs. production.

Keywords: Heat transfer; industrial processes; energy efficiency; sustainability.

INTRODUÇÃO

O crescimento de impactos ambientais e problemas sociais, relacionados ao consumo de energia, propiciou um aumento da abrangência dos debates sobre sustentabilidade nos últimos anos. Isso leva as indústrias a buscar melhorias em suas relações socioambientais, desenvolvendo ferramentas que otimizem o uso de recursos a favor do meio ambiente. Ou seja, tornou-se essencial o desenvolvimento sustentável, com uma visão a longo prazo, que trata de forma equilibrada as questões econômicas, sociais e ambientais (TRES; ZANIN; KRUGER; MAGRO, 2021).

Cabe enfatizar que uma produção sustentável se caracteriza como a produção de bens por meio de processos e sistemas que são não poluentes. Sendo que esses processos produtivos devem priorizar a conservação energética e os recursos naturais sem deixar de ser economicamente viáveis. No entanto, eles devem ainda propiciar, tanto a curto e a longo prazo, resultados seguros e saudáveis tanto para os funcionários, quanto para as comunidades e consumidores. Devido a toda essa conjuntura, que envolve o consumo de recursos energéticos e as implicações ambientais envolvidas, tanto países desenvolvidos como os em desenvolvimento, têm-se deparado com o grande desafio de desenvolver meios de produção, distribuição, transformação e consumo de energia sem intensificar e, se possível minimizar, os efeitos negativos à sociedade e ao meio ambiente (CAMIOTO; REBELATTO, 2014).

Atualmente, no mundo, 80% da energia produzida é proveniente de combustíveis fósseis (BANCO MUNDIAL, 2006), ou seja, fica evidente que a maior parte da demanda mundial de energia é suprida por essa fonte finita e não renovável. Com um papel vital no crescimento econômico global, estima-se que até 2040, haverá um crescimento de 40% da demanda total de energia. Apesar dos combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e

carvão serem a fonte predominante, a contribuição dos mesmos na produção total de energia por várias fontes diminuirá (HASSAN; ILYAS; JALIL; ULLAH, 2021).

Considerando-se esse ritmo acelerado de consumo de petróleo sem novas descobertas significativas de reservas do mesmo, especialistas tem alertado para um futuro próximo onde metade das reservas petrolíferas do planeta já estarão consumidas. Da Rosa e Gomes (2004) situaram esse futuro próximo em torno de 2050, pois de acordo com dados apresentados pelos mesmos, através de um método denominado “Pico de Hubbert”, o futuro da produção de petróleo no mundo terá um pico na década de 20 e declinará para metade na década de 50.

Contribui para esse cenário as poucas jazidas de petróleo que vem sendo descobertas, pois são de alto custo de exploração, situam-se em águas profundas e ultra profundas, com petróleo pesado ou extrapesado, necessitando de um elevado volume de recursos na prospecção do mesmo. Além de toda essa conjuntura exploratória desfavorável, há a necessidade de redução nas emissões de gases poluentes, pois o consumo de combustíveis poluentes vem sendo relacionado ao longo dos anos com as mudanças climáticas e o efeito estufa (CHAVES; GOMES, 2014).

Portanto, o que se têm no cenário atual é uma demanda elevada por energia e vários problemas ambientais ocasionados na geração e consumo da mesma. Por outro lado, esses problemas propiciados na produção de energia têm motivado a busca por novas alternativas, mais eficientes e que melhorem os processos que utilizam a mesma. Dentre muitas possibilidades de melhoria, um caso específico é a recuperação de calor residual, pois trata-se de um campo que tem sido amplamente explorado com o intuito de melhorar a eficiência energética. Há uma estimativa no setor industrial de que se desperdiça entre 20% e 50% da energia na forma de calor, ou seja, perde-se muita energia térmica através de gases quentes de exaustão, água utilizada em processos de resfriamento e perdas de calor em superfícies de equipamentos quentes e produtos aquecidos (RESTREPO; ALVARADO; CACUA, 2021).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo traçar um panorama da recuperação e reaproveitamento de energia térmica ao verificar quais métodos de recuperação estão sendo aplicados e como vem sendo reutilizada a energia térmica recuperada.

METODOLOGIA

Nesta seção detalha-se a metodologia para a revisão sistemática da literatura (RSL), que foi utilizada na realização deste estudo. Diferente das revisões narrativas ou tradicionais, nas quais abordam-se as informações de forma geral e ampla sobre o tema em questão, as revisões sistemáticas são abrangentes e não tendenciosas, pois os critérios que se adotam para sua elaboração são divulgados (GALVÃO; PEREIRA, 2014), ou seja, são revisões que se elaboram para serem metódicas, explícitas e passíveis de serem reproduzidas por outros pesquisadores (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

ESTRATÉGIA DE PESQUISA

No presente estudo, utilizaram-se como diretrizes norteadoras, os tópicos abordados por Snyder (2019) em “Literature review as a research methodology: An overview and guidelines” tendo como foco a recuperação de energia térmica e o reaproveitamento da mesma.

De acordo com as orientações de Snyder (2019), elaborou-se uma estratégia de pesquisa a fim de se ter uma RSL adequada. Ou seja, utilizou-se uma estratégia composta por etapas que estão representadas na figura 1.

Figura 1: Fluxograma da estratégia de pesquisa em etapas.



Fonte: Autores (2022).

DELIMITAÇÃO DAS QUESTÕES A SEREM ESTUDADAS

Destacam-se, entre os objetivos desta revisão sistemática da literatura (RSL), o levantamento e compreensão dos métodos existentes para recuperação e reaproveitamento de energia térmica. Partindo dessas informações, buscou-se no cenário atual de eficiência energética, verificar quais métodos estão sendo utilizados na recuperação e como está sendo

reutilizada essa energia recuperada. Portanto apresentam-se a seguir 3 perguntas elaboradas, as quais foram utilizadas como base para se explorar e discutir a literatura disponível:

- 1) Qual é o cenário geral de produção e uso de energia térmica na indústria?
- 2) Quais métodos estão sendo pesquisados para recuperação de energia térmica residual?
- 3) Quais são os benefícios obtidos com os métodos pesquisados e utilizados na indústria?

DEFINIÇÃO CRONOLÓGICA E DAS BASES DE DADOS A SEREM CONSULTADAS

A definição cronológica e das bases de dados a serem consultadas, foram determinadas de acordo com os seguintes critérios: disponíveis nas bases de dados Web of Science e Scielo; artigos publicados no período de 2013 a 2022, ou seja, não excedendo mais do que 10 anos desde a publicação deles.

DEFINIÇÃO DOS TERMOS DE BUSCAS E OPERADORES BOOLEANOS

Neste tópico descrevem-se as consultas realizadas nas bases de dados, para obter as informações contidas nas bibliotecas das mesmas. Para essas consultas se definiram termos chaves relacionados aos questionamentos propostos, combinando-se os mesmos com operadores booleanos. A pesquisa se iniciou de forma abrangente em relação à temática da recuperação de energia térmica e foi sendo refinada ao longo do processo de consulta.

A primeira busca que foi realizada e que será representada pela sigla B1, combinou 3 termos chaves com o operador booleano AND, ou seja, utilizou-se na busca 1 “thermal AND energy AND recovery”. Já a segunda busca que será representada pela sigla B2, combinou 2 termos chaves com o operador booleano AND, ou seja, utilizou-se na busca 2 “heat AND recovery”.

Ressalta-se ainda que após definidos os termos de busca, também se associou os mesmos ao termo “systematic literature review”, pois conforme Snyder (2019) deve-se verificar se já existem revisões sobre o assunto e avaliar se é justificável uma nova revisão. Pode-se considerar a necessidade de uma nova revisão caso a última tenha mais de 5 anos ou se apesar de recente a revisão apresenta falhas identificadas em seu desenvolvimento.

BUSCA E ARMAZENAMENTO DOS ARTIGOS

Na etapa de seleção dos artigos, foram aplicados alguns critérios de inclusão e exclusão, ou seja, realizou-se um refinamento na filtragem dos artigos eliminando-se estudos irrelevantes. Ressalta-se que alguns critérios podem ser utilizados diretamente na base de dados, como por exemplo o ano de publicação, enquanto outros critérios necessitam de leitura do resumo do artigo para serem aplicados.

Como critérios de exclusão definiu-se:

1. Artigos publicados antes de 2013;
2. Artigos de revisão;

3. Publicações que não sejam artigos;
4. Artigos não relacionados à recuperação de energia térmica;
5. Artigos que a recuperação de energia térmica não ocorre em planta industrial;
6. Artigos de simulação, que não foram aplicados na prática;
7. Artigos publicados em mais de uma base de dados;
8. Artigos que não tenham acesso livre;
9. Artigos que estivessem indisponíveis para consulta ou download.

Ressalta-se que os itens 1, 2 e 3 dos critérios de exclusão são aplicáveis no momento da consulta, pois as bases de dados possibilitam a aplicação dos mesmos como filtros de pesquisa e, que os itens 8 e 9, como suas descrições denotam, se aplicam no momento dos downloads dos artigos. Já os itens 4, 5 e 6 requerem a leitura do resumo do artigo para serem verificadas suas aplicações ou não aos mesmos e, o item 7 foi verificado após a consulta nas 2 bases de dados.

Como critérios de inclusão definiu-se:

- 1) Artigos que fornecem informações sobre o cenário geral de recuperação e reaproveitamento de energia térmica;
- 2) Artigos que abordam sobre métodos de recuperação que vem sendo utilizados;
- 3) Artigos que discutem como está sendo reutilizada a energia térmica recuperada.

Inicialmente foram aplicados os critérios de exclusão. Artigos nos quais foram aplicados ao menos um dos critérios definidos, foram excluídos. Após a aplicação dos critérios de exclusão aplicaram-se os critérios de inclusão, onde o artigo necessitava ser enquadrado em pelo menos um dos critérios para ser selecionado.

Ressalta-se que todos os critérios de inclusão não são passíveis de serem aplicados como filtro nas bases de dados, tornando necessária a leitura dos títulos e resumos dos artigos para serem aplicados.

SELEÇÃO DE ARTIGOS PELO RESUMO, CONFORME CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

O Quadro 1 apresenta um panorama dos artigos selecionados após a aplicação dos itens 1, 2 e 3 dos critérios de exclusão nos filtros das bases de dados. Ressalta-se que a base de dados SciELO não disponibilizava até o momento das buscas a opção de filtro para palavras chaves, desta forma as consultas B1 e B2 foram realizadas com a opção “Todos os campos”. Já na base de dados Web of Science a opção de filtro “palavras-chaves” estava disponível e utilizou-se a mesma.

Quadro 1 - Panorama dos artigos consultados.

BASE DE DADOS	B1	B2	B1+B2	Artigos selecionados
SciELO	18	63	81	7
Web of Science	76	16	92	3
Todas as bases	94	79	173	10

Fonte: Autores (2022).

Conforme preestabelecido se eliminaram, após a leitura do resumo, os artigos não relacionados à recuperação de energia térmica e/ou artigos nos quais a recuperação de energia térmica não ocorreu em planta industrial. Também, a partir da leitura do resumo de cada artigo, selecionaram-se artigos que fornecem informações sobre o cenário geral de recuperação e reaproveitamento de energia térmica, e/ou abordassem métodos de recuperação de energia térmica, e/ou discutissem como está sendo reutilizada a energia térmica recuperada, sempre aplicadas no contexto industrial, resultando em um total de 10 artigos para serem analisados. O Quadro 2 lista os 10 artigos selecionados para a RSL nas 2 bases de dados.

Quadro 2 - Artigos selecionados para fundamentar a revisão sistemática.

Título	Autor (es)	Ano
Análise da geração de energia elétrica por meio da utilização de conversores do tipo TEG em lingotamento contínuo de aços	SANTOS, R. F. M.; SPINELLI, J. E.	2019
Analysis of potential waste heat recovery from a stenter in a textile plant	RESTREPO, R. M.; ALVARADO, P.; CACUA, K.	2021
Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: a comparative study	MENG, Y.; CHEN, G.; HONG, G.; WANG, M.; GAO, J.; CHEN, Y.	2019
Evaluación del sistema de generación, distribución y consumo de vapor de una empresa cárnica	ABASCAL, N. L.; LABRADA, Y. F.; CRUZ, R. G. D. L.; SÁNCHEZ, A. P.	2020
Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry	PERIS, B.; ESBRÍ, J. N.; MOLES, F.; BABILONI, A. M.	2015
Heat Recovery Opportunities in a Poultry Slaughterhouse for Generation of Hot Water: A Case Study on Energy Production	TEIXEIRA, G. S.; ALTAFINI, C. R.; KALNIN, J. L.	2020
Investigation on a full-scale heat pipe heat exchanger in the ceramics industry for waste heat recovery	JOUHARA, H.; et al.	2021
Mejora en la eficiencia de calderas bagaceras de alta presión en la Argentina, mediante secado de bagazo	CRUZ, M. C.; COLOMBRES, F. J. F.; GOLATO, M. A.; MORALES, W. D.; PAZ, D.	2013
Optimization of Heat Exchanger Network via Pinch Analysis in Heat Pump-Assisted Textile Industry Wastewater Heat Recovery System	KIM, Y.; et al.	2022
Using waste energy from the Organic Rankine Cycle cogeneration in the Portland cement industry	SÁNCHEZ, J. P. P.; BAENA, O. J. R.; RODRÍGUEZ, B. Á.; CORREA, A. M. O.; RESTREPO, G.	2015

Fonte: Autores (2022).

RESULTADO E DISCUSSÃO

A partir dos artigos selecionados realizou-se a extração, síntese e interpretação das informações contidas nos mesmos, com o objetivo de responder às 3 questões propostas inicialmente.

Qual é o cenário geral de produção e uso de energia térmica na indústria?

As buscas na literatura demonstraram que energia térmica é amplamente usada em vários segmentos industriais, como laticínio, frigorífico, madeireiro, têxtil, cerâmico, produção de cimento, siderúrgico, produção de açúcar, etc. As formas de obtenção ou geração de calor e meio de condução do mesmo também são diversificadas e dependem do segmento industrial e da matriz energética onde a planta encontra-se instalada. Na indústria madeireira da China, por exemplo, no processo de secagem da madeira, segundo Meng et al. (2019) usa-se ventilação de ar forçado que é aquecido através de bobinas, ou seja, o calor é gerado a partir de um sistema de indução elétrica onde o meio condutor de calor é o ar. Já no segmento frigorífico, segundo Teixeira et al. (2020) e Abascal et al. (2020), o meio mais difundido de energia térmica é através de vapor d'água produzido por caldeiras, que geralmente aquecem a água através da queima de combustíveis, ou seja, o calor é gerado através da combustão e o meio de transporte é água aquecida e/ou vapor d'água.

Outros exemplos, que demonstram como o cenário de produção e uso do calor é diversificado, podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 – Exemplos da diversificação do cenário de produção e uso do calor nas indústrias.

Segmento industrial	Forma de obtenção do calor	Uso do calor	Referência
Cerâmico europeu	Combustão de gás natural	Aquecer o ar que circula nos fornos	Jouhara et al. (2021)
Cimento Portland	Queima de combustíveis fósseis	Calcinação e descarbonatação do calcário	Sánchez et al. (2015)
Siderúrgico	Energia elétrica ou queima de combustíveis fósseis	Produção e conformação mecânica do aço	Santos e Spinelli (2019)
Têxtil	Energia elétrica	Tingimento.	Kim et al. (2022)
Têxtil	Energia elétrica	Termofixação	Restrepo et al. (2021)
Açucareiro latino-americano	Combustíveis fósseis, bagaço de cana-de-açúcar ou uma combinação de ambos	Caldeiras	Cruz et al. (2013)

Fonte: Autores (2022).

Observou-se nos artigos que a forma como o calor será produzido depende da disponibilidade da energia primária, ou seja, qual combustível ou fonte de energia predomina na matriz energética local. Podemos analisar dois casos para compreendermos esse fator de escolha. O primeiro caso é da produção de cerâmica na Europa apresentado por Jouhara et al. (2021), que utiliza gás natural para aquecer os fornos, ou seja, a escolha do gás natural justifica-se pois de acordo com a EEA (2021), 77% da matriz energética do continente europeu é de combustíveis fósseis, a qual constitui-se de gás natural, carvão e petróleo. Em contrapartida, temos o segundo caso da indústria açucareira na América Latina, relatado por Cruz et al. (2013), onde a geração de calor é realizada através da queima de combustível fóssil

ou queima de bagaço de cana-de-açúcar ou uma mescla de ambos. Nesse caso o uso de combustível fóssil se deve a características da matriz energética de países latino-americanos e, o uso do bagaço de cana-de-açúcar se deve ao fato do mesmo ser proveniente do próprio processo produtivo, ou seja, estar disponível na planta industrial.

Quanto à escolha do meio de condução do calor, observou-se que o mesmo depende da finalidade a qual será aplicado, ou seja, depende do processo e do produto que pretende se obter. Comparando-se o caso de secagem de madeira discutido por Meng et al. (2019) e o caso de tingimento de tecidos mencionado por Kim et al. (2022) pode-se compreender a tomada de decisão na escolha do meio condutor de calor. Na secagem da madeira, o objetivo é retirar umidade da mesma, logo utiliza-se ar aquecido. Já no processo de tingimento de tecidos, pretende-se induzir a reação do corante com as fibras do tecido, ou seja, a água é aquecida tornando-se a condutora de calor e, propiciando assim aumento na interação entre as moléculas de corante e as fibras do tecido.

Outros pontos a serem considerados na escolha do meio térmico são comentados por Abascal et al. (2020). Os autores comentam que o vapor d'água é um dos meios mais difundidos, devido à facilidade de geração e manuseio. Além disso, a recuperação de condensado leva a economias significativas de energia e do tratamento químico da água utilizada. Além do que as perdas de calor em tubos da rede onde o vapor percorre podem ser conhecidas e controladas, melhorando-se assim eficiência do processo e obtendo-se relação custo-benefício satisfatória.

Quais métodos estão sendo pesquisados para recuperação de energia térmica residual?

Apesar de os processos industriais envolverem uma série de operações unitárias para a transformação de matéria-prima em produtos com valor agregado, com várias transformações de caráter físicas e/ou químicas e, que os fluxos de energia térmica são diversificados nas formas de líquidos quentes, gases de exaustão, ar quente e superfícies sólidas aquecidas, (GIORDANO; BENEDETTI, 2022) observou-se nos artigos selecionados que as pesquisas em recuperação de energia residual podem ser divididas em dois grupos. Um grupo reunindo as pesquisas de cogeração de energia elétrica e o outro grupo as pesquisas de reuso da energia residual na própria planta industrial.

A cogeração ocorre a partir da energia térmica residual que é transformada em energia elétrica (PERIS et al., 2015). No cenário atual, os artigos estudados demonstraram que duas formas de cogeração de eletricidade estão em evidência. Uma forma é a transformação direta de calor em eletricidade, ou seja, através de dispositivos como os *Thermoelectric Generator* (TEG), que quando são alimentados com calor utilizam o efeito Seebeck para gerar eletricidade (SANTOS; SPINELLI, 2019). A outra forma de cogeração, requer primeiro a transformação da energia térmica residual em energia mecânica que será convertida em eletricidade por um gerador elétrico (SÁNCHEZ et al., 2015).

Na cogeração com geradores elétricos, o *Organic Rankine Cycle* (ORC) é um sistema que vem sendo estudado com frequência. Seu princípio de funcionamento consiste em recuperar energia térmica através da evaporação de um fluido de trabalho, reduzindo-se a entalpia em um expansor e produzindo dessa forma trabalho mecânico, que é convertido em eletricidade por um gerador elétrico (PERIS et al., 2015). Seu uso na indústria, conforme

apontam Sánchez et al. (2015), está sendo bem difundido devido ao mesmo ser uma tecnologia extremamente viável para converter calor de baixa temperatura em eletricidade. Os autores ainda destacam as vantagens de o sistema requerer baixa manutenção, trabalhar com pressões operacionais favoráveis e funcionar de forma autônoma.

Já na cogeração sem geradores elétricos, ou seja, com a conversão direta do calor em eletricidade, Santos e Spinelli (2019) argumentam que o uso da tecnologia de TEG tem se mostrado atrativa. Os pontos mais relevantes segundo os autores é justamente o fato de gerar-se energia elétrica sem a presença de peças mecânicas móveis, não produzirem subprodutos nocivos ao meio ambiente durante seu funcionamento, terem vida útil longa e funcionarem em uma faixa de temperatura ampla. Dos pontos destacados pelos autores, o funcionamento do dispositivo em uma ampla faixa de temperatura é o mais atrativo, pois o mesmo viabiliza que o dispositivo seja aplicado a nível industrial, com a cogeração podendo ser realizada com calor residual em baixa temperatura até altas temperaturas, como no processo de lingotamento de aço estudado por Santos e Spinelli (2019).

Ambos os dispositivos TEG e ORC possuem atrativos e são apresentados como de baixa manutenção. Logo, considerando-se o fator manutenção, pode-se argumentar que o ORC fica em desvantagem em relação ao TEG, pois devido à presença de componentes mecânicos móveis, o ORC vai necessitar de mais intervenções para manutenções e suas peças possuirão vida menos prolongada. Ressalta-se que esses são alguns argumentos que podem direcionar as vantagens de se utilizar uma tecnologia em relação a outra considerando o fator manutenção e, a escolha entre um dispositivo e outro para aplicação em uma planta industrial requer a análise em conjunto com outros fatores, como, por exemplo, qual dos dispositivos gerará maior potência elétrica, quais são os custos de aquisição e instalação de cada dispositivo, a disponibilidade de mão de obra especializada para instalação, operação e manutenção e, se o processo industrial é compatível para o uso do dispositivo a ser escolhido.

No outro grupo, que foca no reuso da energia residual em processos na própria planta industrial, observou-se pelos artigos selecionados, a existência de uma ampla gama de métodos que vem sendo pesquisados e utilizados. Pode-se dividir esses métodos em dois subgrupos, no qual um subgrupo trabalha com a recirculação e, o outro subgrupo com a utilização de dispositivos que recuperam o calor residual e reinserem o mesmo em processos da planta industrial.

No método de recirculação, um fluido que foi utilizado no processo, é recirculado aproveitando-se o calor residual do mesmo. O caso dos fornos de secagem na indústria madeireira chinesa, estudado por Meng et al. (2019), é um exemplo, onde o ar quente é recirculado no forno de secagem, ou seja, evita-se descartar o ar aquecido no ambiente, reinserindo o mesmo no processo de secagem através de ventilação forçada. Outra forma de recirculação é o condensado de linhas de vapor, que pode ser devolvido a caldeira ou utilizado em outros processos como a sanitização da planta industrial, equipamentos e utensílios (TEIXEIRA et al., 2020). As principais vantagens da recirculação de condensado é a economia de energia, uma vez que a água já se encontra aquecida e o tratamento químico já ocorreu antes do primeiro uso (ABASCAL et al., 2020).

Outro método de recirculação atrativo é o dos gases de exaustão de processos de combustão. Neste caso evita-se dispensar os gases aquecidos diretamente no ambiente, direcionando os mesmos para outro processo, como no caso abordado por Cruz et al. (2013).

Os autores estudaram o caso em que os gases provenientes da exaustão de combustão da caldeira são utilizados para a secagem do bagaço da cana-de-açúcar, ou seja, aproveita-se o calor residual presente nos gases de exaustão para a retirada da umidade do bagaço e viabiliza este a ser utilizado como combustível na câmara de combustão da caldeira.

No outro subgrupo se têm os métodos de recuperação do calor residual com um dispositivo, sendo este reutilizado nos processos da própria planta industrial. Os dispositivos são diversificados, variando entre trocadores tubulares, bobinas circulares, trocadores de calor de placas, tubos de calor, rodas térmicas, termossifões, etc. A seleção do dispositivo mais adequado depende de critérios como taxa de transferência, fator de incrustação, custo e retorno do investimento e características específicas do equipamento que fornecerá calor residual (RESTREPO et al., 2021).

Quais são os benefícios obtidos com os métodos pesquisados e utilizados na indústria?

Dentre os benefícios obtidos na recuperação de calor residual destacam-se a redução de gases do efeito estufa, diminuição do consumo de combustíveis fósseis, redução do consumo de energia elétrica, otimização do uso de recursos hídricos, viabilização de resíduos industriais para uso como combustíveis, redução dos custos de produção e cogeração de energia elétrica.

Na cogeração de energia elétrica, por exemplo, Sánchez et al. (2015) comprovaram a viabilidade do uso de ORC no processo de produção de clínquer na indústria de cimento. Os autores obtiveram uma recuperação de 19,2% da energia dos gases de exaustão do preaquecedor, produzindo com essa energia recuperada 5,5GWh/ano de energia elétrica ou 23,7 GWh/ano de energia térmica. Essa eletricidade produzida, de acordo com os autores, propicia uma economia 1,18 dólares por tonelada de cimento, que em um ano gera uma economia 0,72 milhões de dólares. Já a energia térmica equivale a 0,31 milhões de dólares em consumo de carvão ou 0,51 \$/t de cimento, ou seja, o sistema ORC evita a emissão de 8kt/ano de CO₂. Os autores ainda ressaltam que o retorno do investimento está estimado em 4,2 anos.

Já Peris et al. (2015), que também estudaram o uso de ORC, mas na indústria de cerâmica, obtiveram uma produção de energia elétrica que se manteve acima de 115 MW/h evitando a emissão de 31 t/ano de CO₂. As diferenças nos valores de energia gerada e emissões de CO₂ evitadas em comparação com os resultados de Sánchez et al. (2015), se devem às peculiaridades de cada planta industrial e seus respectivos processos. Porém em ambos os trabalhos, o retorno do investimento foi similar, pois Sánchez et al. (2015) estimaram 4,2 anos e Peris et al. (2015) 4,6 anos. Ou seja, apesar das diferenças na produção de eletricidade e emissão de CO₂, o payback abaixo de 5 anos é um indicativo do excelente custo-benefício que o sistema ORC pode propiciar.

Outro estudo que corrobora com a viabilidade de sistemas de recuperação de energia residual é a recirculação de calor abordada por Meng et al. (2019). Seus resultados demonstram que, em um forno que foi monitorado no período de 1 ano, sendo utilizado 25 vezes, ao recircular o ar aquecido, obteve-se uma redução de 38,5% de consumo de energia e gerou-se US\$ 446,29 dólares de economia. Os autores ressaltam que o investimento é recuperado em 3,5 anos, ou seja, um excelente retorno segundo as literaturas consultadas.

A recuperação de energia residual nos trabalhos analisados oscilou numa faixa de 15% a 40% o que é condizente com os valores de 20% a 50% apresentados por Restrepo et al. (2021). Também as reduções no consumo de energia elétrica foram significativas, variando dentro de uma faixa de 15% a 40%.

Toda essa recuperação de energia e cogeração, propiciou a diminuição do consumo de combustíveis e energia elétrica, diminuição significativa de emissões de CO₂ e diminuição de custos de produção, como nos casos exemplificados e discutidos.

CONCLUSÃO

A partir da revisão sistemática da literatura foi possível identificar, dentre os principais benefícios da recuperação da energia térmica, a redução no consumo de energia elétrica, as reduções nas emissões de gases do efeito estufa e os retornos financeiros obtidos.

As reduções observadas no consumo de energia elétrica foram significativas, pois os artigos revisados apresentam dados que demonstram que as mesmas estão dentro de uma faixa de 15% a 40%, ou seja, alguns estudos demonstraram ser possível a redução de até 40% na demanda de energia elétrica em processos industriais. Essas reduções por demanda de eletricidade, além de gerarem uma economia pecuniária, impactam diretamente nas emissões de gases poluentes, pois a eletricidade, como observou-se nos artigos pesquisados, em algumas matrizes elétricas são produzidas através da queima de combustíveis fósseis. Logo deixar de consumir energia elétrica em algumas matrizes energéticas, como é o caso da matriz energética europeia, significa queimar menos combustível fóssil e conseqüentemente emitir menos CO₂ no meio ambiente.

Dentre as implicações apresentadas por esta revisão, fica evidente que através da recuperação de energia residual e conseqüente diminuição de consumo de energia elétrica pode-se reduzir o custo de produção. Ou seja, como observou em alguns casos apresentados, houve a redução no custo de produção e conseqüentemente o produto tornou-se mais barato, em outras palavras mais atrativo ao consumidor em termos financeiros.

Já dentre as limitações observadas destaca-se a necessidade de investimento por parte das indústrias para a implantação dos sistemas de recuperação e reutilização de energias residuais. Porém, esse investimento inicial demonstrou ser recuperado dentro de uma faixa que varia de 1 a 5 anos, ou seja, no pior dos cenários em 5 anos o sistema se paga com as economias geradas, e assim passa a gerar benefícios financeiros e ambientais no processo produtivo em que se encontra instalado.

Em resumo, através da lacuna investigada por essa revisão sistemática da literatura, pode-se concluir que a recuperação de energia residual contribui para a redução de gases do efeito estufa, diminuição do consumo de combustíveis fósseis, redução do consumo de energia elétrica, otimização do uso de recursos hídricos, viabilização de resíduos industriais para uso como combustíveis, redução dos custos de produção e cogeração de energia elétrica. Ou seja, todos esses fatores contribuem para que os processos industriais sejam mais sustentáveis, otimizando o consumo de recursos naturais e minimizando os impactos ambientais.

Referências

ABASCAL, N. L.; LABRADA, Y. F.; CRUZ, R. G. D. L.; SÁNCHEZ, A. P. Evaluación del sistema de generación, distribución y consumo de vapor de una empresa cárnica. **Ingeniería y Desarrollo**, v. 38, n. 1, 2020.

CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gest. Prod.**, v. 21, n. 4, p. 732-744, 2014.

CHAVES, M. C. C.; GOMES, C. F. S. Avaliação de biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão. **Production**, v. 24, n. 3, p. 495-507, 2014.

CRUZ, M. C.; COLOMBRES, F. J. F.; GOLATO, M. A.; MORALES, W. D.; PAZ, D. Mejora en la eficiencia de calderas bagaceras de alta presión en la Argentina, mediante secado de bagazo. **Revista Industrial y Agrícola de Tucumán Tomo**, v. 90, p. 7-16, 2013.

European Environment Agency – EEA. **Energy**. 2021. Disponível em:

<<https://www.eea.europa.eu/themes/energy/intro>>. Acesso em: 30 de junho de 2022.

DA ROSA, S. E. S.; GOMES, G. L. O Pico de Hubbert e o Futuro da Produção Mundial de Petróleo. **Revista do BNDES**, v. 11, n. 22, p. 21-49, 2004.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiol. Serv. Saúde**, v. 23, p. 183-184, 2014.

GIORDANO, L.; BENEDETTI, M. A Methodology for the Identification and Characterization of Low-Temperature Waste Heat Sources and Sinks in Industrial Processes: Application in the Italian Dairy Sector. **Energies**, v. 15, p. 155-188, 2022.

HASSAN, A.; ILYAS, S. Z.; JALIL, A.; ULLAH, Z. Monetization of the environmental damage caused by fossil fuels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 21204–21211, 2021.

JOUHARA, H.; et al. Investigation on a full-scale heat pipe heat exchanger in the ceramics industry for waste heat recovery. **Energy**, v. 223, artigo 120037, 2021.

KIM, Y.; et al. Optimization of Heat Exchanger Network via Pinch Analysis in Heat Pump-Assisted Textile Industry Wastewater Heat Recovery System. **Energies**, v. 15, artigo 3090, 2022.

MENG, Y.; et al. Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: a comparative study **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 21, p. 545 - 558, 2019.

PERIS, B.; ESBRÍ, J. N.; MOLES, F.; BABILONI, A. M. Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. **Energy**, V. 85, 534-542, 2015.

RESTREPO, R. M.; ALVARADO, P.; CACUA, K. Analysis of potential waste heat recovery from a stenter in a textile plant. **Revista DYNA**, v. 88, p. 292-302, 2021.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Rev. bras. fisioter**, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007

SÁNCHEZ, J. P. P.; BAENA, O. J. R.; RODRÍGUEZ, B. Á.; CORREA, A. M. O.; RESTREPO, G. Using waste energy from the Organic Rankine Cycle cogeneration in the Portland cement industry. **Revista DYNA**, v. 82, p. 15-20, 2015.

SANTOS, R.F.M.; SPINELLI, J.E. Análise da geração de energia elétrica por meio da utilização de conversores do tipo TEG em lingotamento contínuo de aços. **Revista Matéria**, v.24, n.3, 2019.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business research**, v. 104, p. 333-339, 2019.

TEIXEIRA, G. S.; ALTAFINI, C. R.; KALNIN, J. L. Heat Recovery Opportunities in a Poultry Slaughterhouse for Generation of Hot Water: A Case Study on Energy Production. **Ingeniería e Investigación**, v. 40, n. 1, p. 60-69, 2020.

TRES, N.; ZANIN, A.; KRUGER, S. D.; MAGRO, C. B. D. Sustainability practices adopted by Industrial companies. **Rev. Adm. UFSM**, v. 14, p. 1140-1159, 2021.

World Bank Pakistan strategic country environmental assessment. The World Bank, South Asia Environment and Social Development Unit, Washington D.C, 2006.

*Recebido em 01/05/2023
Aprovado em 03/07/2023*