

# Analysis of Critical Factors for Energy Efficiency in Productive Systems: A Systematic Review

Taís O. S. Alfonso, Ricardo A. Cassel, Julio C. M. Siluk, Bibiana P. da Silva, Simone F. Venturini

**Abstract**— Energy efficiency has received attention in recent years due to increased demand for electricity. Thus, consuming less energy to manufacture the same amount of products is essential for maintaining the productive activities of society. This research aimed to identify the factors that influence energy efficiency in factories. For this, a systematic literature review was performed. Among the selected articles, twelve factors were grouped in the follow dimensions: technology, support systems, process, product, climatic conditions and people. The results showed that the factors that have more technological elements were more mentioned in the selected articles than the ones that had more human elements. It is concluded that the energy efficiency of factories can be improved by developing policies that explore the identified factors.

**Index Terms**— Energy Efficiency, Energy Consumption, Industry Efficiency

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por energia elétrica tem crescido devido ao aumento da população, que necessita desse serviço para atividades diárias e conforto, e em razão do avanço tecnológico das empresas, que requerem esse serviço em seus processos [1]–[3]. Além disso, a energia elétrica é essencial na operação das organizações, em especial nas empresas do setor industrial [4]. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2019, o setor industrial brasileiro foi responsável pela demanda e consumo de 30% da energia elétrica gerada pelo país [5]. Assim, a eficiência energética das organizações precisa ser observada.

A eficiência energética pode ser entendida como um indicador cujo valor aumenta quando um produto é transformado com uma menor quantidade de energia em relação a um período anterior [6]. Assim, a eficiência energética é uma relação entre o total de energia necessário para transformar um bem e o potencial de desempenho do sistema [7], [8]. Além disso, essa métrica também pode ser associada a atividades de gestão que procuram aumentar a eficiência energética dos sistemas produtivos, reduzindo o consumo energético de um mesmo volume de produção [9].

A eficiência energética é um assunto relevante para as organizações devido aos custos da própria energia, sobretudo nos países emergentes. Devido ao ritmo de desenvolvimento desses países, estima-se que a demanda deles por energia excederá a dos países desenvolvidos nas próximas décadas [10]–[12]. No caso do Brasil, o consumo de energia elétrica por parte das empresas cresceu 3,3% em relação às duas últimas décadas, contudo, o valor da tarifa de energia subiu 13,7% do ano de 2017 para 2018 [13]. Assim, o aumento do consumo de energia atrelado a evolução dos custos

energéticos prejudica a competição das indústrias brasileiras internacionalmente [14].

A eficiência energética pode ser avaliada em diferentes níveis. Considerando o nível de país ou estado, o estudo de [15] avalia a interação entre a eficiência produtiva e a ambiental. Por outro lado, o estudo [16] avalia a eficiência de um setor específico, nesse caso o industrial. Os autores apresentam seis fatores que influenciam a eficiência energética em indústrias de alto consumo de energia, sendo eles: investimento, fatores ambientais e estruturais, produto interno bruto (PIB), preço da energia e mão de obra.

Dentro das plantas fabris, a eficiência energética pode ser avaliada no nível da fábrica, dos processos ou dos equipamentos [17]. O nível fabril corresponde a todas as atividades realizadas dentro da planta e envolve os sistemas de apoio à fabricação dos produtos. O nível de processo envolve a análise de um processo específico. Por exemplo, [18] destacam como mudanças no sistema de resfriamento podem afetar o consumo de energia elétrica de uma planta. Os autores explanaram que quanto maior a eficiência do sistema de resfriamento, menor a quantidade de água necessária no processo e, por consequência, menor a quantidade de energia necessária no sistema de bombeamento. Já em relação ao nível de equipamento, a avaliação se dá diretamente nos instrumentos que compõem os processos, por exemplo, sensores, motores e bombas [17].

Este estudo procura responder por meio de uma revisão de literatura a seguinte questão: quais fatores influenciam a eficiência energética em sistemas produtivos? Essa questão é pertinente visto que as empresas brasileiras ainda possuem baixos índices de eficiência energética [19], [20]. Especificamente, esta revisão busca entender os fatores que influenciam a eficiência energética considerando o nível fabril, de modo a contribuir no processo de tomada de decisão.

Este trabalho possui quatro seções além desta introdução. A seção II traz informações e trabalhos a fim de contextualizar esta pesquisa. A seção III traz os procedimentos metodológicos da revisão de literatura, bem como informações sobre as bases de dados pesquisadas. Na seção IV os resultados estão subdivididos em duas seções: Descrição da Revisão e Análise e Discussão. Por fim está a seção de Conclusão e as referências utilizadas.

## II. CONTEXTUALIZAÇÃO

A pobreza energética deprime e atrasa o desenvolvimento social e econômico. Dados indicam que 1,1 bilhão das pessoas mais pobres do mundo vive inteiramente sem acesso à eletricidade [21]. Por outro lado, nas últimas décadas houve um aumento contínuo da população que juntamente com o alto

padrão de vida causaram um aumento substancial na demanda de energia, aumentando as emissões de carbono e agravando a crise das mudanças climáticas [22].

As condições climáticas e a eficiência energética são considerados problemas a serem planejados e estudados pelos governos e instituições de pesquisa [23]. As medidas que visam melhorar a eficiência energética levam a muitos outros benefícios que podem abordar questões sociais, financeiras, jurídicas e de competitividade [24]–[26]. A melhoria na eficiência energética também pode ser monitorada por meio de indicadores físicos e/ou econômicos [27].

Muitos trabalhos discutem a eficiência energética no transporte e veículos [28]–[31], na rede residencial e urbana [32]–[35], no setor marítimo [36]–[39] e em setores industriais [40]–[42].

O trabalho de [43] traz sugestões para entidades governamentais responsáveis pela gestão de energia. Por meio de uma revisão de literatura, foram apontados aspectos em que a indústria pode aumentar a sua eficiência energética. Outros trabalhos também buscam aumentar a eficiência de setores econômicos. Por exemplo, o estudo de [44] avalia a eficiência energética e ambiental do setor industrial da China. Esse também foi o objetivo do trabalho de [45]. Esses autores utilizaram o modelo DEA de dois estágios para avaliar a eficiência energética de fator total da indústria chinesa. Por outro lado, o estudo de [46], tendo como tema os sistemas de combustão, procura definir o perfil energético e a lacuna tecnológica da indústria de cal colombiana.

A indústria têxtil também é objeto de estudo na China. O estudo de [47] analisou os fatores que influenciam a eficiência energética na indústria têxtil. Outro trabalho envolvendo o desenvolvimento da eficiência energética na indústria têxtil foi realizado por [48], desta vez na Colômbia e Alemanha. Na Europa, há estudos que tratam do consumo de energia em processos industriais, dos indicadores de desempenho utilizados para acompanhar boas práticas em eficiência energética e da avaliação de programas de gerenciamento de energia [49]–[51].

Outros estudos têm por objetivo analisar e aumentar a eficiência de equipamentos específicos, como compressores de ar, tornos, impressoras para sinterização a laser, evaporadores a vácuo, fornos e motores [52]–[59]. As indústrias que possuem processos químicos em suas plantas fabris também buscam alternativas para aumentar o desempenho dessas operações. Os estudos de [60] e [61] procuram aumentar a eficiência energética dos processos por meio do uso de materiais, como escórias de alta temperatura. Já o trabalho de [62] utiliza programação matemática para minimizar o uso de água e efluentes em uma indústria petroquímica.

Pode-se observar que a eficiência energética é um fator importante para a tomada de decisão [63]–[65]. Os estudos de [66] e [67] têm por tema o processo de tomada de decisão e a eficiência energética. O primeiro estudo realiza sua pesquisa sobre eficiência energética em pequenas e médias indústrias, já o segundo procura identificar as barreiras que afetam o processo de tomada de decisão sobre investimentos em eficiência energética em indústrias em geral. Por outro lado, há estudos que vinculam a eficiência energética a um contexto estratégico. Por exemplo, [68] desenvolveram um modelo que consumo de energia para otimização da eficiência energética

de uma manufatura e [69] procuraram definir o contexto estratégico da tomada de decisões para melhorar a eficiência energética em sistemas de energia industrial.

### III. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa foi realizada em outubro de 2019 e conduzida a partir de uma revisão sistemática de literatura. A estratégia adotada nesta revisão incorporou definições a respeito da questão de pesquisa; da estratégia de busca nas bases de dados; da análise de elegibilidade e codificação das publicações encontradas; da avaliação de qualidade; da síntese dos resultados e da apresentação da pesquisa [70]. A questão da pesquisa que dirigiu as atividades neste estudo foi: quais fatores influenciam a eficiência energética em sistemas produtivos?

Em relação a estratégia de busca nas bases de dados, as palavras-chave da questão de pesquisa desta revisão foram determinadas como “eficiência energética”, “indústria”, “indicador” e “fatores”. Com essas palavras, buscou-se localizar trabalhos que observassem os fatores relevantes na medição da eficiência energética em sistemas produtivos. A versão final da *string* de busca, validada por um especialista, agregou palavras sinônimas às citadas e foi estabelecida conforme segue: [("energy efficien\*" OR "energy assessment") AND ("industr\*" OR "manufactur\*") AND "factor\*" AND (evaluation OR indicator\*)]. Os operadores booleanos AND e OR, respectivamente, foram utilizados para vincular as palavras chave e incorporar expressões sinônimas.

As bases de dados utilizadas neste trabalho foram *Scopus* e *Web of Science*. Em relação à análise de elegibilidade, o idioma da publicação foi considerado como um critério de exclusão, sendo mantidos na análise apenas publicações escritas em inglês. Após a exclusão de publicações duplicadas, os artigos remanescentes foram avaliados por (i) título, (ii) abstract e palavras-chave e (iii) texto completo.

Na etapa de avaliação do texto completo, realizou-se a codificação das publicações encontradas. As categorias utilizadas para classificação dos fatores emergiram dos próprios dados. Com o objetivo de manter-se a rastreabilidade dos fatores coletados, manteve-se a expressão original utilizada pelos autores dos documentos. Dessa forma, é possível acompanhar a trajetória realizada entre as expressões originais utilizadas no documento, a síntese dos fatores identificados e seu respectivo agrupamento em dimensões (*vide* Tabela 1 na seção Resultados).

Na etapa de avaliação da qualidade, alguns critérios foram empregados. Por exemplo, observou-se o rigor científico na descrição do método e o confronto dos resultados obtidos com a literatura.

Ao fim do processo, 30 artigos foram selecionados para análise [71]–[100]. Os documentos selecionados para análise cumpriram os requisitos de qualidade e o recorte realizado para o nível fabril. As etapas do método utilizado e os artigos resultantes de cada etapa são apresentados na Fig. 1.

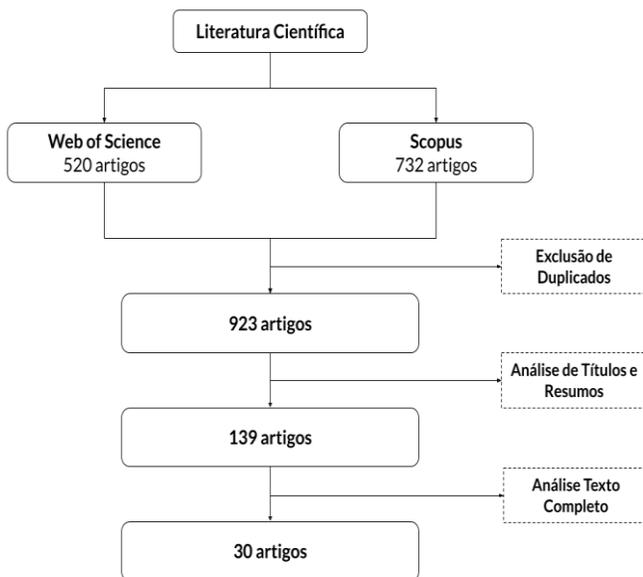


Fig. 1. Fluxo do Processo de Revisão

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dessa pesquisa são divididos em duas subseções: a descrição dos trabalhos selecionados na revisão de literatura e a análise e discussão dos fatores identificados.

##### A. Descrição da Revisão

Os artigos selecionados nesta revisão possuem por tema a eficiência energética. Foram incluídos no estudo os artigos que tratassem da eficiência energética no nível fabril.

Para [71] a eficiência de um sistema pode ser aprimorada diminuindo-se o gasto energético de atividades que não agregam valor ao produto ou mudando-se a tecnologia presente no processo. A mudança de uma tecnologia para outra mais eficiente é corroborada por diversos autores [71]–[77]. Na pesquisa realizada por [78], foi demonstrado que o aumento da eficiência a partir da mudança de tecnologia pode compensar o investimento em novos equipamentos. Tendo a indústria automotiva como objeto de estudo, os autores também pontuaram que a eficiência energética está atrelada ao tamanho das peças produzidas, ao processo escolhido e ao tamanho dos lotes. No estudo, peças e lotes pequenos são produzidos com mais eficiência energética em máquinas de corte a laser (LBM) enquanto peças e lotes maiores se saem melhor em fresadoras.

O estudo de [77] identificou que o custo da energia em uma indústria de papel poderia ser reduzido a partir da otimização do sistema de bombas, visto que esse componente, utilizado para bombeamento de polpas fibrosas e fluentes, demandava um quarto do consumo de energia no caso estudado. Já o estudo de [79], realizado em uma fábrica de celulose, indicou o reprojeto dos trocadores de calor utilizados nos processos de limpeza química e mecânica da matéria-prima como uma alternativa para reduzir o consumo energético. Outros autores identificados nesta revisão reforçam a importância da eficiência energética dos equipamentos como essencial para a eficiência energética total da planta [80]–[83]. De forma complementar, [84] e [85]

citam a eficiência do sistema principal como determinante para a eficiência da fábrica e o estudo de [86] conceitua “gargalo de energia” como o equipamento que mais consome energia dentro do sistema. Uma vez identificado o gargalo de energia, ele pode ser otimizado [86].

A eficiência energética também pode ser melhorada a partir da redução do consumo dos sistemas de apoio, tais como sistemas de exaustão, refrigeração e iluminação [80], [87]. O estudo de [87] apresentou uma abordagem para o cálculo da eficiência energética que contribui para o entendimento do consumo de energia de cada sistema fabril, inclusive sistemas de apoio. Já [80] utilizam conceitos de avaliação de desempenho organizacional e uma abordagem de auditoria energética para identificar o consumo de sistemas principais e de apoio. A auditoria energética foi realizada levando em conta fatores como ações administrativas, motores e sistemas elétricos, iluminação e sistemas de ar-condicionado e ar comprimido. Para identificar o consumo do sistema principal e auxiliares, foi utilizado um diagnóstico energético.

Outro aspecto identificado nesta revisão relacionado aos processos da fábrica dizem respeito à modificação dos sistemas visando à recuperação do calor gerado pelo funcionamento dos equipamentos [81], [83], [88]–[90]. Esta prática, chamada de cogeração, pode melhorar a eficiência energética dos sistemas fabris de forma ecológica e potencialmente econômica, conforme indicou o estudo realizado por [83]. Os autores realizaram estudos em plantas localizadas na Alemanha e na Austrália e destacaram que o método da cogeração pode ser tanto aplicado em fábricas já existentes como no projeto de novas instalações. No estudo de [81] os autores identificaram como melhores práticas para melhorar a eficiência energética, além da utilização do calor residual do processo, a otimização das operações da linha e o isolamento adequado do sistema. Desse modo, a manutenção adequada dos equipamentos e a definição de seus parâmetros contribuem para o desempenho da fábrica [73], [75].

Os estudos de [73] e [91] indicam que o aproveitamento dos resíduos do processo também contribui para a eficiência energética. Por exemplo, o trabalho de [91] foi realizado na indústria siderúrgica. Eles observaram o efeito do reaproveitamento do aço no sistema de produção. Este cenário de reutilização de material aumentou a eficiência energética da fábrica.

O estudo de [76] apontou a contribuição da “eficiência energética no fluxo de tarefas” para o desempenho da fábrica. Esse indicador é composto pela eficiência do processo de produção e pela eficiência da programação dos recursos necessários para manufatura dos produtos. Por sua vez, o estudo de [92] segue uma linha similar: eles indicam que fatores como o esquema de planejamento das operações e processos, além do dimensionamento da capacidade dos equipamentos influenciam a eficiência energética total. Para eles, o sobredimensionamento dos equipamentos e planos de operação são fontes de ineficiência no processo [92].

Outro aspecto relacionado à eficiência energética apontado por alguns estudos nesta revisão é o volume de produto acabado produzido nas plantas e sua relação com a capacidade instalada [84], [91], [93]–[95]. Por exemplo, o estudo de [95] mede a economia de energia em uma fábrica a partir da diferença do volume produzido antes e após melhorias

tecnológicas nos equipamentos do processo. Os estudos de [93] e [94] apresentam o volume de produção como um indicador para gestão da eficiência, visto que esse fator condiciona o consumo de energia. Ampliando esse fator, o estudo de [79] considerou que as variações sazonais dos produtos também impactam na eficiência.

A escolha das matérias-primas e aspectos relacionados ao produto também influenciam a eficiência energética [78], [96]–[98]. O estudo de [97], realizado em uma fábrica de cimentos, indicou que a unidade da matéria-prima pode ser um fator que influencia a eficiência. Por sua vez, o estudo de [98], realizado em uma montadora de automóveis e em ambientes de simulação, indica que o *mix* de produtos influencia na eficiência energética. Por fim, o estudo de [96] indica que a produção de produtos defeituosos, obsoletos ou desnecessários aumenta o consumo energético, visto que, nos casos da produção de itens defeituosos ou obsoletos, novas unidades precisarão ser produzidas, aumentando a demanda energética. Já no caso dos produtos desnecessários, a eficiência cairá, visto que esses itens permanecerão em estoque e não sairão do sistema. Para mitigar esses problemas os autores utilizam a filosofia *lean*, sugerindo o pensamento "certo da primeira vez" e a produção puxada como alternativas para aumentar a eficiência energética.

Além de aspectos tecnológicos e relativos aos processos, outro aspecto crítico para a eficiência energética são os indivíduos que atuam nos sistemas de produção [75], [99]. O estudo de [75] pontua que a padronização e treinamento das equipes, agrupados no que eles chamam de "fator operacional", são indispensáveis para a eficiência energética. O trabalho de [99] realizado em pequenas e médias empresas de engenharia de precisão, indica que mudanças de comportamento podem diminuir o consumo de energia. Por sua vez, a mudança de comportamento pode ser induzida a partir de elementos visuais monitorados regularmente [99]. Além disso, outro aspecto que pode diminuir o consumo de energia são as políticas administrativas implantadas para esse fim [80].

Um último aspecto identificado nesta revisão como fator que colabora no desempenho energético são as condições climáticas [95], [97], [100]. Por exemplo, o estudo de [100] compara a eficiência de quatro fábricas de polímeros localizadas em duas zonas climáticas distintas. Os autores também modelaram uma das plantas com o objetivo de estudar seu comportamento em um ambiente simulado, sugerindo que possa haver políticas distintas para o aumento da eficiência energética dependendo do clima em que a fábrica está localizada. Por sua vez, os estudos de [84], [95], [97] indicam que a temperatura dentro das plantas fabris também pode ser um fator determinante para a eficiência energética.

### B. Análise e Discussão

Os artigos selecionados foram publicados entre os anos de 2007 e 2019, sendo que 40% deles encontram-se entre os anos de 2017 e 2018. Os artigos estão agrupados em 17 periódicos. Destacam-se os periódicos *Energy*, com oito artigos e o *Journal of Cleaner Production*, com quatro artigos. Os autores dos artigos selecionados são de 19 países diferentes. A Fig. 2 destaca os países presentes neste estudo.

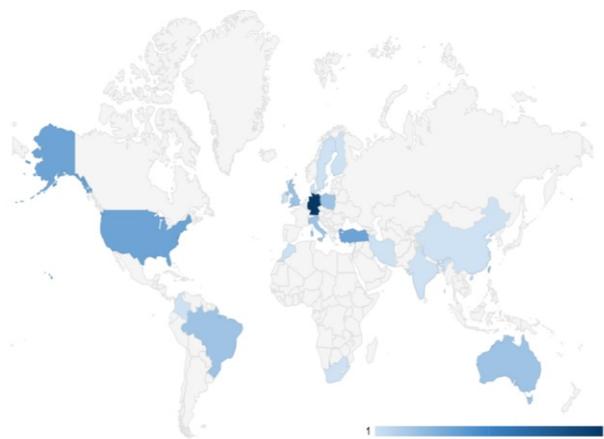


Fig. 2. Países presentes no estudo.

A intensidade das cores na figura indica a quantidade de autores presentes em cada país. O país mais representativo foi a Alemanha, com sete autores. Após, tem-se os Estados Unidos e a Turquia, com 3 autores cada. Houve colaboração entre países em cinco estudos selecionados. Os países que colaboram entre si foram (1) Índia e Reino Unido, (2) Estados Unidos e Alemanha, (3) Irlanda e Reino Unido e (4) Alemanha e Austrália, este último duas vezes.

A análise dos artigos selecionados retornou doze fatores que influenciam a eficiência energética no nível fabril, os quais foram agrupados em seis dimensões. A dimensão Tecnologia se refere ao fator Eficiência dos Equipamentos e Subsistemas. A dimensão Sistemas de Apoio se refere ao fator que leva esta mesma descrição. A dimensão Processo agrupa os fatores Cogeração/Recuperação de Calor, Manutenção, Planejamento da Produção, Reaproveitamento de Resíduos, Volume de Produção. A dimensão Produto se refere ao fator que leva esta mesma descrição. A dimensão Pessoas compreende os fatores Cultura e Política Empresarial. Por último, a dimensão Clima agrupa os fatores Climatização da Planta e Condições Externas. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os fatores que influenciam a eficiência energética no nível fabril encontrados nesta pesquisa, bem como a fonte que menciona cada fator. A coluna rastreabilidade apresenta a expressão utilizada no documento.

A eficiência dos equipamentos corresponde ao consumo dos recursos produtivos em relação às unidades de produto manufaturadas. Os autores [77], [79], [80] citaram equipamentos específicos quando falaram desse fator, como bombas, trocadores de calor, motores e sistemas elétricos e de ar comprimido.

Já outros autores pontuaram a eficiência dos equipamentos de modo geral [72]–[76]. Ainda outros autores mencionaram o que pode ser chamado de gargalo de energia, indicando que a eficiência energética da planta fabril depende do subsistema ou equipamento mais influente energeticamente, ou com maior consumo de energia [83]–[86].

TABELA I  
FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO NÍVEL FABRIL –  
PARTE 1

Fator	Rastreabilidade	Fonte
Eficiência dos Equipamentos e Subsistemas	Consumo de energia do sistema de bombas	[77]
	Máquina com maior eficiência energética	[86]
	Eficiência da tecnologia do processo	[26], [33], [38]
	Eficiência do equipamento	[82]
	Melhorias específicas nos equipamentos	[81]
	<i>Redesign</i> de trocadores de calor	[79]
	Eficiência do equipamento	[73]
	Máquinas com maior eficiência energética	[83]
	Fator de Construção	[75]
	Eficiência do subsistema mais influente energeticamente	[85]
	Eficiência energética da máquina	[76]
	Desempenho operacional	[84]
	Motores e sistemas elétricos e de ar comprimido	[80]
	Sistemas de Apoio	Quantidade de energia gasta em atividades que não agregam valor
Sistemas de exaustão e refrigeração de água de processo		[87]
Sistemas de apoio (iluminação e ar condicionado)		[80]
Cogeração / Recuperação de Calor	Utilização do calor residual	[81]
	Recuperação de calor desperdiçado e a orientação para a produção adequada de cogerações	[83]
	Recuperação de energia	[89]
	Recuperar e reutilizar o calor residual	[88]
	Modificação da utilidade visando a cogeração	[90]
Manutenção	Isolamento adequado do sistema	[81]
	Parâmetros do processo	[73]
	Fator de Manutenção	[75]
Planejamento da Produção	Otimização das operações da linha	[81]
	Tamanho de lote	[78]
	Dimensionamento dos equipamentos	[92]
	Esquema de planejamento de operações e processos	[92]
Reaproveitamento de Resíduos Volume de Produção	Eficiência energética no fluxo de tarefas	[76]
	Reaproveitamento dos resíduos no processo	[73]
	Utilização de aço reciclado	[91]
	Variações sazonais	[79]
	Produção entre os períodos pré e pós-retrofit	[95]
	Taxa de produção	[91]
	Volume de produção	[93]
	Utilização da capacidade	[84]
	Relação volume produzido e consumo energético	[94]

Os sistemas da fábrica podem ser divididos naqueles que diretamente transformam as matérias-primas em produtos e em sistemas de apoio. Assim, o consumo dos sistemas de apoio também se mostrou um fator que influencia a eficiência energética. Entre eles podem ser citados os sistemas de

exaustão, refrigeração de equipamentos por meio de água, iluminação e climatização da planta [80], [87]. Além disso, [71] chamam a atenção para o consumo de atividades que não agregam valor aos produtos, tais como o transporte de insumos.

TABELA II  
FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO NÍVEL FABRIL –  
PARTE 2

Fator	Rastreabilidade	Fonte
Produto	Teor de umidade das matérias-primas	[97]
	Produtos defeituosos, obsoletos ou desnecessários	[96]
	<i>Mix</i> de produto	[98]
	Tamanho da peça	[78]
Cultura	Comportamento	[99]
	Fator Operacional	[75]
	Política Empresarial	Mudanças operacionais [99] Ações administrativas [80]
Climatização da Planta	Temperatura ambiente	[84], [97]
	Mudança climática	[95]
Condições Externas	Condições climáticas	[100]

A dimensão processo foi a que mais agrupou fatores, sendo cinco no total. Os fatores incluídos na dimensão processo foram: Cogeração/Recuperação de Calor, Manutenção, Planejamento da Produção, Reaproveitamento de Resíduos, Volume de Produção. Acerca do fator Cogeração/Recuperação de Calor, os autores ressaltaram que reutilizar o calor gerado pelos processos é determinante para melhorar a eficiência [81], [88]–[90]. Além disso, esse fator deve ser levado em consideração nos projetos de novas fábricas, de modo a incluir essa tecnologia nos equipamentos a serem adquiridos para a planta [83].

O fator manutenção compreende tanto conservar os equipamentos da planta, quanto determinar os parâmetros do processo e isolar os sistemas contra perdas energéticas [73], [75], [81]. No estudo de [73] foi destacado que os parâmetros do processo podem influenciar a eficiência, visto que definições equivocadas podem aumentar o consumo dos equipamentos.

Os aspectos do planejamento da produção também devem ser observados. Elementos como tamanho de lote e a capacidade dos equipamentos podem tanto diminuir como aumentar o consumo energético da planta [78], [92]. O estudo de [78] destacou que lotes menores devem ser preferencialmente manufaturados em equipamentos cujo funcionamento demande um baixo consumo energético. Já lotes maiores podem ser executados em equipamentos que demandem mais energia, visto que seu consumo será dividido entre as unidades produzidas no lote. Assim, as operações na linha de produção devem ser otimizadas levando em conta a eficiência energética do processo de produção [76], [81]. O trabalho de [76] também apontou que os recursos para manufaturar os produtos devem ser programados de forma eficiente. Além disso, sobredimensionar a capacidade dos recursos pode ser uma fonte de ineficiência do sistema [92].

O aproveitamento dos resíduos do processo também contribui para a eficiência energética, visto que, em alguns casos, utilizar um material já processado pode reduzir o consumo energético de uma nova batelada [73], [91]. Por exemplo, no caso da indústria siderúrgica, reinserir o aço residual no processo de produção ao invés de descartá-lo pode melhorar a eficiência energética total da planta, visto que a nova batelada demandará menos energia para ser produzida [91].

O último fator que influencia a eficiência energética dentro da dimensão processo é o volume produzido [84], [91], [93]–[95]. O volume pode contribuir para a eficiência energética devido a alguns elementos. O primeiro deles é a mudança de volume devido a mudanças tecnológicas nos equipamentos da planta [95]. Uma vez que os equipamentos demandam o mesmo montante energético, mas, devido a mudanças tecnológicas, a taxa de produção é maior, a eficiência energética melhorará. Além disso, manter a mesma capacidade produtiva pode impactar a eficiência quando a fábrica opera com demandas sazonais [79]. Isso se deve pois, nos períodos de baixa demanda, a capacidade permanecerá a mesma, enquanto o volume produzido reduzirá. Assim, o consumo energético por unidade produzida será maior, piorando a eficiência energética [93].

Os elementos relacionados ao produto confeccionado nas plantas também podem influenciar a eficiência energética das fábricas [78], [96]–[98]. Por exemplo, em processos onde a matéria-prima necessita estar seca para ser processada, o elemento umidade é determinante, conforme aponta o estudo de [97] realizado em uma fábrica de cimentos. Além disso, consumir energia fabricando produtos defeituosos ou obsoletos também impacta na eficiência energética. Visto que esses produtos terão que ser descartados, o consumo energético por unidade produzida será elevado [96]. Por fim, o *mix* de produtos pode influenciar a eficiência energética. Conforme indicado por [98], quanto maior a demanda energética do *mix* de produtos, menor será a eficiência energética total.

As condições climáticas e de temperatura também são determinantes para a eficiência energética [84], [95], [97], [100]. Os estudos [95], [97] exploram o fator climatização da planta. Foi descoberto que a temperatura da planta pode influenciar no consumo energético necessário para o processamento das matérias-primas [97]. Em alguns casos, uma temperatura elevada pode favorecer a economia de energia, visto que o consumo necessário para o processamento das matérias-primas seria menor. Em outros casos, quando há subprocessos resfriamento, uma temperatura mais amena pode reduzir o consumo energético. Essas relações podem ser extrapoladas para o fator condições externas, que diz respeito às características climáticas da região onde a planta está localizada, conforme demonstrado no estudo de [100].

Como contraponto aos elementos tecnológicos que influenciam a eficiência energética estão os indivíduos que atuam no sistema [75], [80], [99]. O fator cultura inclui o grau de padronização das atividades e os treinamentos realizados [75]. As atividades realizadas de modo padronizado podem reduzir o consumo energético se forem planejadas. Além disso, as fábricas também podem adotar estratégias de gestão para melhorar a eficiência energética, implantando políticas

administrativas específicas [80]. Por fim, conforme indica o estudo de [99], a gestão de energia a partir elementos visuais pode melhorar o comportamento dos indivíduos, visto que contribui na sensibilização sobre o tema.

A Fig. 3 consolida os fatores identificados nesta pesquisa. A representação de cada fator na figura leva em conta o número de autores que o citaram. Assim, os fatores representados em círculos maiores foram citados por mais estudos, enquanto os fatores em círculos menores foram citados por menos estudos. Além do número de estudos em que cada fator foi citado, levou-se em conta a quantidade de elementos tecnológicos e humanos presentes em cada fator. Esse dado foi levantado ao longo da leitura de cada documento.

O diagrama demonstra que os fatores que possuem elementos tecnológicos foram mais mencionados nos artigos selecionados do que os fatores com influência humana. O fator eficiência dos equipamentos e subsistemas foi considerado como influenciado praticamente apenas por aspectos tecnológicos, seguido de consumo dos sistemas de apoio e cogeração/recuperação de calor. Na parte central do diagrama, considerando as influências de aspectos tecnológicos e humanos como similares, estão os fatores: reaproveitamento de resíduos, produto, climatização da planta, condições externas, volume de produção e planejamento da produção. À direita do diagrama estão os fatores mais influenciados por aspectos humanos, a saber: manutenção, política empresarial e cultura.

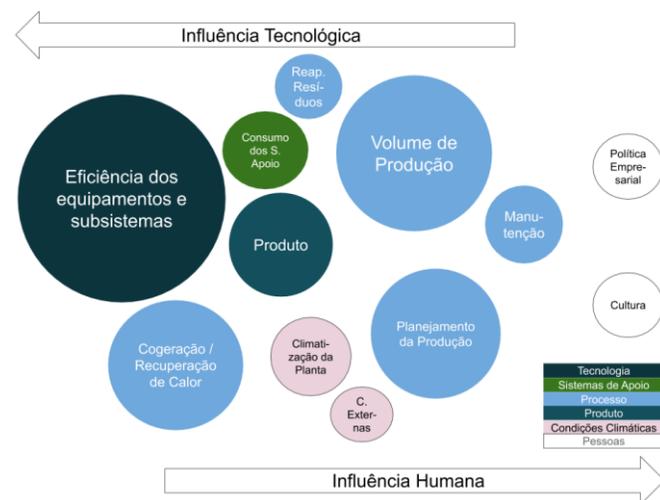


Fig. 3. Diagrama dos fatores que influenciam a eficiência energética no nível fabril.

## V. CONCLUSÃO

Nas organizações onde o custo da energia elétrica é um elemento significativo, a eficiência energética é um assunto relevante no processo de tomada de decisão. Nesse sentido, esta pesquisa teve por objetivo identificar os fatores que influenciam a eficiência energética em sistemas produtivos. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura nas bases *Scopus* e *Web of Science*, considerando as seguintes palavras-chave: eficiência energética, indústria, indicador e

fatores. Após a remoção dos artigos duplicados, foram identificados 923 documentos, os quais foram submetidos à análise de título e resumos. Após essa etapa, 139 artigos foram selecionados para leitura completa, dos quais 30 foram considerados qualificados conforme os critérios definidos.

Foram levantados doze fatores, os quais foram agrupados em seis dimensões. O fator Eficiência dos Equipamentos e Subsistemas, classificado na dimensão Tecnologia, foi o mais citado, estando presente em doze dos artigos selecionados nesta revisão. Esse fator pode ser entendido a partir da relação entre o consumo dos recursos produtivos e as unidades de produto efetivamente manufaturadas.

Na dimensão Sistemas de Apoio, o fator Consumo dos Sistemas de Apoio foi identificado. Os sistemas de apoio são aqueles que auxiliam a execução das atividades dos sistemas principais. Por sua vez, os sistemas principais atuam diretamente na fabricação de bens. Entre os sistemas de apoio identificados nesta revisão, encontram-se os sistemas de exaustão, refrigeração de equipamentos por meio de água, iluminação e climatização da planta.

A dimensão Processo foi a que mais agrupou fatores, a saber: Cogeração/Recuperação de Calor, Manutenção, Planejamento da Produção, Reaproveitamento de Resíduos e Volume de Produção. Observou-se que reutilizar o calor gerado pelos processos pode ser uma ação importante na melhoria da eficiência energética. Esse fator também pode ser levado em consideração no projeto de novas plantas fabris. Atrrelado ao reaproveitamento do calor gerado pelos processos, o fator Manutenção envolve a realização de atividades que isolem os sistemas contra perdas energéticas, bem como a conservação dos equipamentos e a definição dos parâmetros de processo. Dentro do fator Planejamento da Produção, viu-se que o tamanho de lote e a capacidade dos equipamentos pode influenciar o consumo energético da planta. Ações para melhorias da eficiência energética também podem ser tomadas em termos do Reaproveitamento de Resíduos, quando há a vantagem e possibilidade de utilizar um material já processado em uma nova batelada. A dimensão Processo também trata do Volume de Produção, onde mudanças tecnológicas nos equipamentos existentes e variações sazonais podem influenciar a eficiência energética.

O fator Produto foi agrupado na dimensão que leva o mesmo nome. Dentro desse fator, devem ser observados elementos como umidade da matéria-prima, fabricação de produtos defeituosos e *mix* de produtos.

A dimensão Condições Climáticas agrupou dois fatores: Climatização da Planta e Condições Externas. Dentro dessa dimensão, observa-se que a temperatura da planta e as condições climáticas da região podem influenciar no consumo energético necessário para o processamento das matérias-primas.

Por fim, na dimensão Pessoas, outros dois fatores foram identificados: Política Empresarial e Cultura. O fator Política Empresarial envolve a adoção de estratégias de gestão que tenham por objetivo melhorar a eficiência energética do sistema. Já o fator Cultura inclui o grau de padronização dos processos.

Percebeu-se que os fatores que possuem mais elementos tecnológicos foram mais mencionados nos artigos selecionados. Também se verificou que é possível desenvolver

políticas para explorar os fatores identificados, visando a melhoria da eficiência energética das fábricas.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD) com as agências financiadoras (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1). O Professor Ricardo Augusto Cassel é Bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora 2. O Professor Julio Cesar Mairesse Siluk é Bolsista de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico 2 (DT-2/CNPq).

#### REFERÊNCIAS

- [1] S. Narayan and N. Doytch, "An investigation of renewable and non-renewable energy consumption and economic growth nexus using industrial and residential energy consumption," *Energy Econ.*, vol. 68, pp. 160–176, 2017, doi: 10.1016/j.eneco.2017.09.005.
- [2] K. Saidi, M. M. Rahman, and M. Amamri, "The causal nexus between economic growth and energy consumption: New evidence from global panel of 53 countries," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 33, no. April, pp. 45–56, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.05.013.
- [3] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, "Photovoltaic solar energy: Conceptual framework," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. June 2016, pp. 590–601, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.081.
- [4] M. O. Adetutu, A. J. Glass, and T. G. Weyman-Jones, "Decomposing energy demand across BRIIC countries," *Energy Econ.*, vol. 54, pp. 396–404, 2016, doi: 10.1016/j.eneco.2016.01.001.
- [5] EPE, "Balanço Energético Nacional," 2020.
- [6] A. N. C. VIANA, E. da C. Bortoni, F. J. H. Nogueira, J. Haddad, L. A. H. Nogueira, and O. J. Venturini, *Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações*. Itajubá, 2012.
- [7] G. A. Boyd, "Estimating the changes in the distribution of energy efficiency in the U.S. automobile assembly industry," *Energy Econ.*, vol. 42, pp. 81–87, 2014, doi: 10.1016/j.eneco.2013.11.008.
- [8] F. C. Fenerich, S. E. G. Da Costa, and E. P. De Lima, "Energy Efficiency in Industrial Environments: Overview and Research Agenda," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, pp. 415–422, 2017.
- [9] IEA, "Energy efficiency," *International Energy Agency*, 2016.
- [10] N. Apergis, G. C. Aye, C. P. Barros, R. Gupta, and P. Wanke, "Energy efficiency of selected OECD countries: A slacks based model with undesirable outputs," *Energy Econ.*, vol. 51, pp. 45–53, 2015, doi: 10.1016/j.eneco.2015.05.022.
- [11] Z. Cserekyei and D. I. Stern, "Global energy use: Decoupling or convergence?," *Energy Econ.*, vol. 51, no. 2015, pp. 633–641, 2015, doi: 10.1016/j.eneco.2015.08.029.
- [12] A. Ferreira *et al.*, "Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. April 2016, pp. 181–191, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.102.
- [13] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019 ano base 2018. Ministério de Minas e Energia – MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE," 2019.
- [14] K. Schwab, *The global competitiveness report 2015-2016*, vol. 5, no. 5. 2015.
- [15] L. Jiang, H. Folmer, and M. Bu, "Interaction between output efficiency and environmental efficiency: Evidence from the textile industry in Jiangsu Province, China," *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 123–132, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.068.
- [16] M. J. Li and W. Q. Tao, "Review of methodologies and policies for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry," *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 203–215, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.039.
- [17] Y. Lu, T. Peng, and X. Xu, "Energy-efficient cyber-physical production network: Architecture and technologies," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 129, no. January, pp. 56–66, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.01.025.
- [18] J. Martínez, F. Ireta, J. M. Lozano, M. Picón, and C. Rubio, "Using Onion Diagram for the Reduction of Water and Energy in Cooling

- Systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, pp. 1829–1834, 2016.
- [19] J. Goldemberg, "Energy in Brazil," in *The Oxford Handbook of the Brazilian Economy*, Oxford University Press, 2018, p. 358.
- [20] J. Goldemberg, "Energia e desenvolvimento no Brasil," Rio de Janeiro, 2020.
- [21] S. Hirmer and P. Guthrie, "The benefits of energy appliances in the off-grid energy sector based on seven off-grid initiatives in rural Uganda," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. September, pp. 924–934, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.152.
- [22] B. P. Center, "Annual Energy Outlook 2020," 2020.
- [23] O. Zaim and T. U. Gazel, "Overcoming the shortcomings of energy intensity index: a directional technology distance function approach," *Energy Effic.*, vol. 11, no. 3, pp. 559–575, 2018.
- [24] L. C. Brun and G. Gereffi, "The multiple pathways to industrial energy efficiency: A systems and value chain approach," *Rep. Prep. Environ. Def. Fund.*, 2011.
- [25] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, pp. 38–50, 2019.
- [26] N. Zhou, "A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030," *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 793–819, 2019.
- [27] M. G. Patterson, "What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues," *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 377–390, 1996.
- [28] O. Gamayunova and K. Kulakov, "Using alternative fuels to increase energy efficiency in the transport sector," in *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 135, p. 2024.
- [29] N. Kawata and A. Chiba, "Design of Switched Reluctance Generator for Competitive Energy Efficiency in the Latest Hybrid Electric Vehicle," in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 6461–6467.
- [30] G. Trotta, J. Spangenberg, and S. Lorek, "Energy efficiency in the residential sector: identification of promising policy instruments and private initiatives among selected European countries," *Energy Effic.*, vol. 11, no. 8, pp. 2111–2135, 2018.
- [31] J. R. Ziolkowska and B. Ziolkowski, "Energy efficiency in the transport sector in the EU-27: A dynamic dematerialization analysis," *Energy Econ.*, vol. 51, pp. 21–30, 2015.
- [32] W. Zhu, Z. Zhang, X. Li, W. Feng, and J. Li, "Assessing the effects of technological progress on energy efficiency in the construction industry: A case of China," *J. Clean. Prod.*, vol. 238, p. 117908, 2019.
- [33] L. Manukhina, "Methods for calculating the reliability and energy efficiency in the construction of real estate," in *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 110, p. 1069.
- [34] C. Benavente-Peces, "On the Energy Efficiency in the Next Generation of Smart Buildings—Supporting Technologies and Techniques," *Energies*, vol. 12, no. 22, p. 4399, 2019.
- [35] A. Alberini and M. Filippini, "Transient and persistent energy efficiency in the US residential sector: Evidence from household-level data," *Available SSRN 2655970*, 2015.
- [36] J. Borg and H. von Knorring, "Inter-organizational collaboration for energy efficiency in the maritime sector: the case of a database project," *Energy Effic.*, vol. 12, no. 8, pp. 2201–2213, 2019.
- [37] H. N. Psaraftis, "Decarbonization of maritime transport: to be or not to be?," *Marit. Econ. Logist.*, vol. 21, no. 3, pp. 353–371, 2019.
- [38] R. Sanchez-Iborra, I. G. Líaño, C. Simoes, E. Couñago, and A. F. Skarmeta, "Tracking and monitoring system based on LoRa technology for lightweight boats," *Electronics*, vol. 8, no. 1, p. 15, 2019.
- [39] J. Chen, Y. Fei, and Z. Wan, "The relationship between the development of global maritime fleets and GHG emission from shipping," *J. Environ. Manage.*, vol. 242, pp. 31–39, 2019.
- [40] J. Haraldsson and M. T. Johansson, "Barriers to and Drivers for Improved Energy Efficiency in the Swedish Aluminium Industry and Aluminium Casting Foundries," *Sustainability*, vol. 11, no. 7, p. 2043, 2019.
- [41] E. Yáñez, A. Ramírez, A. Uribe, E. Castillo, and A. Faaij, "Unravelling the potential of energy efficiency in the Colombian oil industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 176, pp. 604–628, 2018.
- [42] W. Eichhammer, M. Reuter, M. Patel, and R. Walz, "Measuring multiple benefits for energy efficiency in the industrial sector," in *Industrial efficiency 2018*, 2018, vol. 2018, pp. 249–258.
- [43] R. Menghia, A. Papetti, M. Germani, and M. Marconi, "Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools," *J. Clean. Prod.*, p. 118276, 2019.
- [44] F. Chen, T. Zhao, and J. Wang, "The evaluation of energy–environmental efficiency of China's industrial sector: based on Super-SBM model," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 21, no. 7, pp. 1397–1414, 2019.
- [45] J. Wu, B. Xiong, Q. An, J. Sun, and H. Wu, "Total-factor energy efficiency evaluation of Chinese industry by using two-stage DEA model with shared inputs," *Ann. Oper. Res.*, vol. 255, no. 1–2, pp. 257–276, 2017.
- [46] V. Alcántara, "A study case of energy efficiency, energy profile, and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 393–401, 2018.
- [47] L. Peng, Y. Zhang, Y. Wang, X. Zeng, N. Peng, and A. Yu, "Energy efficiency and influencing factor analysis in the overall Chinese textile industry," *Energy*, vol. 93, pp. 1222–1229, 2015.
- [48] C. I. P. Martínez, "Energy use and energy efficiency development in the German and Colombian textile industries," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, no. 2, pp. 94–103, 2010.
- [49] E. Worrell, R. F. A. Cuelenaere, K. Blok, and W. C. Turkenburg, "Energy consumption by industrial processes in the European Union," *Energy*, vol. 19, no. 11, pp. 1113–1129, 1994.
- [50] R. Anna, M. Simone, Z. Claudio, and F. Giorgio, "Key Performance Indicators Of 'Good Practices' of Energy Efficiency In Industry: Application To Real Cases In Italy And In The European Union," *Int. J. Energy Prod. Manag.*, vol. 2, no. 3, pp. 239–250, 2017.
- [51] A. Sa, P. Thollander, E. Cagno, and M. Rafiee, "Assessing Swedish Foundries Energy Management Program," *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2780, 2018.
- [52] J. dos Santos Mascarenhas, H. Chowdhury, M. Thirugnanasambandam, T. Chowdhury, and R. Saidur, "Energy, exergy, sustainability, and emission analysis of industrial air compressors," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 183–195, 2019.
- [53] J. Zhao, L. Li, Y. Wang, and J. W. Sutherland, "Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, no. 9–12, pp. 2891–2905, 2019.
- [54] J. Tuo, F. Liu, P. Liu, H. Zhang, and W. Cai, "Energy efficiency evaluation for machining systems through virtual part," *Energy*, vol. 159, pp. 172–183, 2018.
- [55] T. Hetteshheimer, S. Hirzel, and H. B. Roß, "Energy savings through additive manufacturing: an analysis of selective laser sintering for automotive and aircraft components," *Energy Effic.*, vol. 11, no. 5, pp. 1227–1245, 2018.
- [56] M. Vondra, V. Máša, and P. Bobák, "The energy performance of vacuum evaporators for liquid digestate treatment in biogas plants," *Energy*, vol. 146, pp. 141–155, 2018.
- [57] A. S. Gutiérrez, J. B. C. Martínez, and C. Vandecasteele, "Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 273–280, 2013.
- [58] Y. Han, Z. Geng, Z. Wang, and P. Mu, "Performance analysis and optimal temperature selection of ethylene cracking furnaces: A data envelopment analysis cross-model integrated analytic hierarchy process," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 122, pp. 35–44, 2016.
- [59] E. Cazacu, V. NÁVRÁPESCU, and I.-V. Nemoianu, "On-Site Efficiency Evaluation for In-Service Induction Motors," *Rev. Roum. Sci. Techn.—Électrotechn. Énerg.*, vol. 58, no. 1, pp. 63–72, 2013.
- [60] J. Ding, Y. Wang, R. Gu, W. Wang, and J. Lu, "Thermochemical storage performance of methane reforming with carbon dioxide using high temperature slag," *Appl. Energy*, vol. 250, pp. 1270–1279, 2019.
- [61] S. Gong, C. Shao, and L. Zhu, "Energy efficiency optimization of ethylene production process with respect to a novel FLPEM-based material-product nexus," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 8, pp. 3528–3549, 2019.
- [62] É. Hansen, M. A. S. Rodrigues, M. E. Aragão, and P. M. de Aquim, "Water and wastewater minimization in a petrochemical industry through mathematical programming," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1814–1822, 2018.
- [63] A. Hoang, P. Do, and B. Lung, "Energy efficiency performance-based prognostics for aided maintenance decision-making: Application to a manufacturing platform," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 2838–2857, 2017.
- [64] M. Bahiraçai and S. Heshmatian, "Optimizing energy efficiency of a specific liquid block operated with nanofluids for utilization in electronics cooling: a decision-making based approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 154, pp. 180–190, 2017.
- [65] W. König, "Energy efficiency in industrial organizations—A cultural-

- institutional framework of decision making,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 60, p. 101314, 2020.
- [66] A. Trianni, E. Cagno, and S. Farné, “Barriers, drivers and decision-making process for industrial energy efficiency: A broad study among manufacturing small and medium-sized enterprises,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 1537–1551, 2016.
- [67] A. Trianni, E. Cagno, F. Marchesani, and G. Spallina, “Classification of drivers for industrial energy efficiency and their effect on the barriers affecting the investment decision-making process,” *Energy Effic.*, vol. 10, no. 1, pp. 199–215, 2017.
- [68] A. Dietmair and A. Verl, “A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–133, 2009.
- [69] A. Melnik and K. Ermolaev, “Strategy Context of Decision Making for Improved Energy Efficiency in Industrial Energy Systems,” *Energies*, vol. 13, no. 7, p. 1540, 2020.
- [70] A. Dresch, D. P. Lacerda, and J. A. V. Antunes, *Design science research: A method for science and technology advancement*. 2015.
- [71] M. Bornschlegel, M. Bregulla, and J. Franke, “Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 644–656, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.059.
- [72] E. S. Dogbe, M. A. Mandegari, and J. F. Görgens, “Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process,” *Energy*, vol. 145, pp. 614–625, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.134.
- [73] I. Schlei-Peters, M. G. Wichmann, I. G. Matthes, F. W. Gundlach, and T. S. Spengler, “Integrated Material Flow Analysis and Process Modeling to Increase Energy and Water Efficiency of Industrial Cooling Water Systems,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 22, no. 1, pp. 41–54, 2018, doi: 10.1111/jiec.12540.
- [74] G. Baldissoni, G. Cavaglià, and M. Demichela, “Are intensified processes safer and more reliable than traditional processes? an emblematic case study,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 36, pp. 415–420, 2014, doi: 10.3303/CET1436070.
- [75] A. V. H. Sola and A. A. de P. Xavier, “Organizational human factors as barriers to energy efficiency in electrical motors systems in industry,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 11, pp. 5784–5794, 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2007.05.024.
- [76] Y. Wang and Z. Ji, “Energy efficiency quantitative analysis method of discrete manufacturing system,” *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 31, no. 19–21, 2017, doi: 10.1142/S0217984917400711.
- [77] A. Agricola and S. Blum, “Systematic cost reduction: Small pump, big saving,” *Int. Pap. IPW*, pp. 9–10, 2007.
- [78] T. Kamps, M. Lutter-Guenther, C. Seidel, T. Gutowski, and G. Reinhart, “Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 47–60, 2018, doi: 10.1016/j.cirpj.2018.01.002.
- [79] J. Persson and T. Berntsson, “Influence of seasonal variations on energy-saving opportunities in a pulp mill,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1705–1714, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.07.023.
- [80] R. P. Zanardo, J. C. M. Siluk, F. de Souza Savian, and P. S. Schneider, “Energy audit model based on a performance evaluation system,” *Energy*, vol. 154, pp. 544–552, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.179.
- [81] S. Fellaou and T. Bounahmidi, “Evaluation of energy efficiency opportunities of a typical Moroccan cement plant: Part I. Energy analysis,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 1161–1172, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.010.
- [82] M. Dowlati, M. Aghbashlo, and M. Mojarab Soufiyan, “Exergetic performance analysis of an ice-cream manufacturing plant: A comprehensive survey,” *Energy*, vol. 123, pp. 445–459, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.007.
- [83] B. A. Schlüter and M. B. Rosano, “A holistic approach to energy efficiency assessment in plastic processing,” *J. Clean. Prod.*, vol. 118, pp. 19–28, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.037.
- [84] B. Beisheim, K. Rahimi-Adli, S. Krämer, and S. Engell, “Energy performance analysis of continuous processes using surrogate models,” *Energy*, vol. 183, pp. 776–787, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.176.
- [85] T. Taner and M. Sivrioglu, “Energy-exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey,” *Energy*, vol. 93, pp. 641–654, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.09.007.
- [86] A. Bajpai, K. J. Fernandes, and M. K. Tiwari, “Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and energy consumption in a serial manufacturing system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 296–304, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.074.
- [87] S. C. Hu, Y. W. Tsai, B. R. Fu, and C. K. Chang, “Assessment of the SEMI energy conversion factor and its application for semiconductor and LCD fabs,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 121, pp. 39–47, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.044.
- [88] C. I. Tuan, Y. L. Yeh, C. J. Chen, and T. C. Chen, “Performance assessment with Pinch technology and integrated heat pumps for vaporized concentration processing,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 226–234, 2012, doi: 10.1016/j.jtice.2011.10.004.
- [89] M. Z. Sogut, Z. Oktay, and A. Hepbasli, “Energetic and exergetic assessment of a trass mill process in a cement plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2316–2323, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.05.013.
- [90] F. Bühler, T. Van Nguyen, J. K. Jensen, F. M. Holm, and B. Elmegaard, “Energy, exergy and advanced exergy analysis of a milk processing factory,” *Energy*, vol. 162, pp. 576–592, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.029.
- [91] S. Siitonen, M. Tuomaala, and P. Ahtila, “Variables affecting energy efficiency and CO2 emissions in the steel industry,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2477–2485, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.12.042.
- [92] G. Valencia, E. Ramos, and L. Meriño, “Energy planning for gas consumption reduction in a hot dip galvanizing plant,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, no. June, pp. 697–702, 2017, doi: 10.3303/CET1757117.
- [93] J. Wojdalski, “Energy efficiency of a confectionery plant - Case study,” *J. Food Eng.*, vol. 146, no. April 2018, pp. 182–191, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.08.019.
- [94] J. Wojdalski, B. Drózd, J. Grochowicz, A. Magryś, and A. Ekielski, “Assessment of Energy Consumption in a Meat-Processing Plant-a Case Study,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 6, no. 10, pp. 2621–2629, 2013, doi: 10.1007/s11947-012-0924-4.
- [95] J. Kelly Kissock and C. Eger, “Measuring industrial energy savings,” *Appl. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 347–361, 2008, doi: 10.1016/j.apenergy.2007.06.020.
- [96] S. Baysan, E. Cevikcan, and Ş. Satoglu, “Assessment of Energy Efficiency in Lean Transformation: A Simulation Based Improvement Methodology,” in *Assessment and Simulation Tools for Sustainable Energy Systems*, vol. 129, 2013.
- [97] A. Atmaca and M. Kanoglu, “Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 261–269, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.060.
- [98] G. Boyd, E. Dutrow, and W. Tunnessen, “The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use,” *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 6, pp. 709–715, 2008, doi: 10.1016/j.jclepro.2007.02.024.
- [99] J. Cosgrove, F. Doyle, J. Littlewood, and P. Wilgeroth, “A methodology for electricity monitoring and targeting (M&T) in an Irish precision engineering SME,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 10, no. 4–5, pp. 233–240, 2017, doi: 10.1080/19397038.2017.1317877.
- [100] D. Khripko, B. A. Schlüter, B. Rommel, M. Rosano, and J. Hesselbach, “Energy demand and efficiency measures in polymer processing: comparison between temperate and Mediterranean operating plants,” *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 225–233, 2016, doi: 10.1007/s40095-015-0200-2.



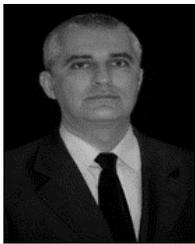
**Taís Oliveira da Silva Alfonso Mestranda** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEP/UFRGS). Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade La Salle (2018). Possui experiência em Gestão de Projetos, Planejamento Estratégico, Metodologias para Resolução de Problemas e Mapeamento de Processos.



**Ricardo Augusto Cassel** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1993), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1996) e doutorado em Management Science - Lancaster University (2000). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Coordenador do Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da UFRGS. Vice-diretor do Centro de Estudos Internacionais sobre Governo (CEGOV) da UFRGS. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Planejamento, Projeto e Controle de Sistemas de Produção, Modelagem Empresarial e Gestão da Cadeia de Suprimentos. É membro da mesa diretora da SAE - Porto Alegre. Desenvolveu projetos de pesquisa aplicada em empresas como PETROBRAS, Samarco, SEBRAE - RS, Secretaria de Desenvolvimento e Incentivo ao Investimento - RS. Foi premiado com o Outstanding Paper Award for Excellence da Emerald Literati Network.

manutenção eletromecânica em usinas de geração de energia elétrica.



**Julio Cezar Mairesse Siluk** Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2007. Atualmente é professor na Universidade Federal de Santa Maria. Possui experiência nas áreas de Gestão Estratégica, Inovação e Competitividade, Avaliação de Desempenho, Planejamento Estratégico, Indicadores de Desempenho, Análise de Investimentos e Gerenciamento de Energia.



**Bibiana Porto da Silva** cursou técnico em Refrigeração e ar condicionado (2011) e Automação Industrial (2014) no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS. Graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande (2015). Pós-graduada do curso de Mestrado em Engenharia de Produção na Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (2016-2018). Professora substituta adjunta do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pelotas (UFPEl) de (05/2018-03/2019). Atualmente Doutoranda do curso de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



**Simone Ferigolo Venturini** Mestranda em Fenômenos de Transporte na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e graduanda em Engenharia Mecânica pela Universidade La Salle. Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade La Salle e formação como Técnico Industrial de Nível Médio com Habilitação em Eletromecânica. Tem experiência na área de manutenção elétrica em redes de distribuição de baixa e média tensão e