

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**CAMPUS DE SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS  
DE MANUFATURA POR MEIO DA ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA  
DO PRODUTO**

**Jean Guilherme Azarias**

Orientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

**Santa Bárbara d'Oeste,**

**2019**

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**CAMPUS DE SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS  
DE MANUFATURA POR MEIO DA ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA  
DO PRODUTO**

**Jean Guilherme Azarias**

Orientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Santa Bárbara d'Oeste,**

**2019**

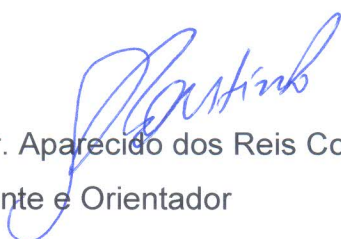
Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP  
Bibliotecária: Marjory Harumi Barbosa Hito - CRB-8/9128.

A992q	<p>Azarias, Jean Guilherme</p> <p>Quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura por meio da abordagem de ciclo de vida do produto / Jean Guilherme Azarias. – 2019. 103 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2019.</p> <p>1. Consumo de Energia Elétrica. 2. Manufatura. 3. Desenvolvimento Sustentável. I. Coutinho, Aparecido dos Reis. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU – 658.5</p>
-------	--

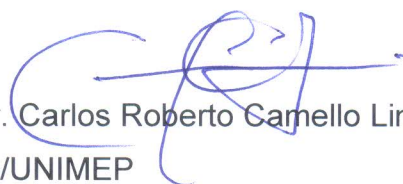
**QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE MANUFATURA  
POR MEIO DA ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA DO PRODUTO**

**JEAN GUILHERME AZARIAS**

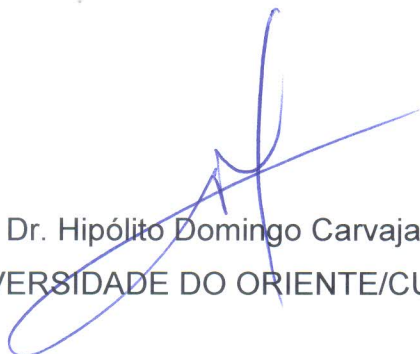
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 12 de fevereiro de 2019, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho – PPGEP/UNIMEP  
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima  
PPGEP/UNIMEP



Prof. Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals  
UNIVERSIDADE DO ORIENTE/CUBA

Dedico este trabalho a todos que não abandonam a busca por um mundo ambientalmente equilibrado e socialmente justo.

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus, por me proporcionar condições essenciais para chegar até o presente momento.

A minha família, Claudenir de Cássia Ilídio, Marcos Antonio Betti Lino, Felipe Ilídio Betti Lino, por me apoiarem em todas as decisões e oferecerem um porto seguro sempre que necessário.

A Jessica Luana Rui, por ser a minha companheira em todos os momentos, contribuindo para o equilíbrio entre o desenvolvimento do trabalho e as atividades da vida pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho, pelo direcionamento e ensinamento acadêmico, pelo apoio pessoal com palavras de tranquilidade em momentos turbulentos e, principalmente, por ser um exemplo profissional que pretendo seguir na minha carreira.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima e Prof. Dr Hipolito Domingo Carvajal Fals, pela disposição em contribuir com esta dissertação desde a qualificação.

Ao Prof. Msc. Eduardo Francisco Simon Ciaco, pela indicação do caminho a seguir, bem como as longas conversas que tivemos nesse trajeto, construindo nossa amizade.

Aos amigos Aurélio Kovaleski, Everton Dias, Felipe Campos Salles e Renan Stenico, pelo compartilhamento de conhecimento e apoio na trajetória.

A empresa de turbocompressores que, além de fazer parte da minha vida profissional, me proporcionou grandes amizades e manteve as portas abertas para que este trabalho fosse desenvolvido.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Só os que se arriscam a ir longe demais  
são capazes de descobrir o quão longe se  
pode ir.”*

Thomas Stearns Eliot

AZARIAS, Jean Guilherme. **Quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura por meio da abordagem de ciclo de vida do produto**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2019.

### **RESUMO**

O setor industrial tem buscado, cada vez mais, uma produção mais limpa e consequente desenvolvimento sustentável. Dentre os impactos ambientais causados pelas indústrias, os aspectos relacionados com a geração e consumo de energia possuem grande relevância. Por outro lado, o consumo de energia está diretamente associado com o desempenho econômico e a qualidade de vida da população, tornando a redução no consumo de energia um grande desafio. Como primeiro passo em busca de maior eficiência energética no setor industrial, é necessário que haja o entendimento e quantificação do consumo de energia do ciclo de vida dos produtos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo propor um guia para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, baseando-se nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O guia proposto é constituído por quatro etapas, passando pela definição do escopo, levantamento do inventário, análise dos resultados e ações de melhoria. Além disso, foi conduzida uma aplicação do guia proposto no sistema de manufatura de turbocompressores, dispositivos que proporcionam aumento de potência em motores de combustão interna. O guia se mostrou viável para a aplicação desejada. Os resultados obtidos no caso indicam que são necessários 96,432 KWh de energia para a produção de um turbocompressor, sendo a maior parte associada com os processos de fundição e de usinagem. Ainda, foi apresentada uma análise em relação ao consumo por componente, proporcionando uma base de dados para futuras intervenções no sistema produtivo.

**Palavras-chave:** Consumo de energia; Manufatura; Avaliação do ciclo de vida; ACV; Turbocompressor.



AZARIAS, Jean Guilherme. **Quantification of energy consumption in manufacturing systems by means of the product life cycle approach.** 2019. 103 p. Thesis (Master's Degree) – Faculty of Engineering, Architecture, and Urbanism, Methodist University of Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2019.

### **ABSTRACT**

The industrial sector has increasingly sought to develop a cleaner production and hence sustainable development. Among the environmental impacts caused by the industries, the aspects related to the generation and consumption of energy have great relevance. On the other hand, energy consumption is directly associated with the economic performance and quality of life of the population, making the reduction energy consumption a great challenge. As a first step in the pursuit of greater energy efficiency in the industrial sector, it is necessary to have the understanding and quantification of the energy consumption of product life cycle. Thus, the present work aims to propose a guide for the quantification of energy consumption in manufacturing systems, based on the concepts of Life Cycle Energy Assessment (LCA). The proposed guide consists of four stages, including scope definition, inventory data collection, results analysis, and improvement actions. In addition, an application of the proposed guide was conducted in the manufacturing system of turbochargers, devices that provide power boost in internal combustion engines. The proposed guide proved to be feasible for the desired application. The results obtained in this case indicate that is required 96.432 KWh of energy for the production of a turbocharger, most of which is associated to the casting and machining processes. Also, is presented an analysis of energy consumption by componente of the turbocharger, providing a database for future interventions in the productive system.

**Keywords:** Energy consumption; Manufacturing; Life cycle assessment; LCA; Turbocharger.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE QUADROS .....	XII
LISTA DE SIGLAS .....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. PROBLEMA DA PESQUISA.....	3
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. OBJETIVO GERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	3
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	7
2.1. PROTOCOLO PARA CONDUÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA.....	8
2.2. VARREDURA HORIZONTAL .....	10
2.2.1. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE AO CONSUMO DE ENERGIA EM MANUFATURA .....	10
2.2.1.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – WEB OF SCIENCE.....	10
2.2.1.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – SCOPUS .....	16
2.2.1.3. ANÁLISE CRUZADA: WEB OF SCIENCE E SCOPUS .....	21
2.2.2. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE À AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA .....	23
2.2.3. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE AOS TURBOCOMPRESSORES.....	24
2.3. VARREDURA VERTICAL .....	25
2.3.1. SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	25
2.3.2. CONSUMO DE ENERGIA .....	27
2.3.2.1. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA NAS INDÚSTRIAS .....	29
2.3.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	31
2.3.3.1. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA (ACV-E).....	33
2.3.4. TURBOCOMPRESSOR.....	35
2.4. SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA.....	37
3. MÉTODO DA PESQUISA.....	39
3.1. CLARIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	41
3.2. ESTUDO DESCRITIVO I .....	41
3.3. ESTUDO PRESCRITIVO .....	41
3.4. ESTUDO DESCRITIVO II .....	42
4. RESULTADOS .....	43
4.1. O GUIA PROPOSTO .....	43
4.1.1. ETAPA 1 – ESCOPO.....	43
4.1.2. ETAPA 2 – INVENTÁRIO .....	44
4.1.3. ETAPA 3 – ANÁLISE.....	47
4.1.4. ETAPA 4 – AÇÕES.....	47
4.2. APLICAÇÃO DO GUIA NO SISTEMA DE MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES .....	48
4.2.1. ESCOPO DO SISTEMA DE MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES .....	48
4.2.2. INVENTÁRIO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES .....	57
4.2.3. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES .....	59
4.2.4. AÇÕES PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES .....	70
5. CONCLUSÕES .....	72
5.1. TRABALHOS FUTUROS .....	73
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICE A – AMOSTRAS: WEB OF SCIENCE E SCOPUS .....	85
APÊNDICE B – PRINCIPAIS CORRENTES DE AUTORES DAS AMOSTRAS.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama simplificado da estrutura do presente trabalho.....	5
Figura 2 – Fluxograma da Revisão da Literatura .....	8
Figura 3 – Quantidade de publicações por ano na <i>Web of Science</i> .....	11
Figura 4 – Distribuição da amostra por filiação na <i>Web of Science</i> .....	12
Figura 5 – Quantidade anual de artigos entre os principais periódicos na <i>Web of Science</i> .....	14
Figura 6 – Mapa de rede dos principais autores cocitados na <i>Web of Science</i> .....	15
Figura 7 – Quantidade de publicações por ano na <i>Scopus</i> .....	17
Figura 8 – Distribuição da amostra por filiação na <i>Scopus</i> .....	18
Figura 9 – Quantidade anual de artigos entre os principais periódicos na <i>Scopus</i> .....	19
Figura 10 – Mapa de rede dos principais autores cocitados na <i>Scopus</i> .....	20
Figura 11 – Evolução do consumo de energia por setor no mundo.....	27
Figura 12 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida .....	32
Figura 13 – Turbocompressor em corte transversal – principais componentes.....	36
Figura 14 – Fluxograma do desenvolvimento metodológico da pesquisa .....	40
Figura 15 – Guia para quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura.....	43
Figura 16 – Relação entre as variáveis para coleta dos dados .....	45
Figura 17 – Organização dos dados de inventário em uma planilha Excel.....	45
Figura 18 – Os componentes analisados no turbocompressor .....	49
Figura 19 – Fontes de consumo ao longo do sistema produtivo.....	51
Figura 20 – Processos e componentes da produção de turbocompressores.....	53
Figura 21 – Etapas de operações para os processos de fundição .....	54
Figura 22 - Consumo de energia direto e aplicação dos componentes analisados .....	60
Figura 23 – Consumo de energia para produção da carcaça compressora .....	61
Figura 24 – Consumo de energia para produção do rotor do compressor .....	62
Figura 25 – Consumo de energia para produção da carcaça da turbina.....	64
Figura 26 – Consumo de energia para produção do rotor da turbina.....	65
Figura 27 – Consumo de energia para produção da carcaça central.....	67
Figura 28 – Distribuição do consumo de energia ao longo do sistema produtivo.....	68
Figura 29 – Distribuição por tipo de consumo ao longo do sistema produtivo.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da amostra por origem geográfica na <i>Web of Science</i> .....	13
Tabela 2 – Os artigos com maior índice de citação corrigido na <i>Web of Science</i> .....	16
Tabela 3 – Distribuição da amostra por origem geográfica na <i>Scopus</i> .....	18
Tabela 4 – Os artigos com maior índice de citação corrigido na <i>Scopus</i> .....	21
Tabela 5 – Evolução do consumo energético industrial no Brasil .....	29
Tabela 6 – Inventário do ciclo de vida da produção de turbocompressores.....	58
Tabela 7 – As três correntes de autores cocitados na amostra da <i>Web of Science</i> .....	103
Tabela 8 – As três correntes de autores cocitados na amostra da <i>Scopus</i> .....	103

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Conjuntos de palavras-chave utilizadas para <i>strings</i> de busca .....	9
Quadro 2 – Artigos para o referencial teórico de consumo de energia em manufatura .....	22
Quadro 3 – Artigos para o referencial teórico de Avaliação Energética do Ciclo de Vida (ACV-E)..	23
Quadro 4 – Artigos para o referencial teórico de Turbocompressores para Veículos Pesados .	24
Quadro 5 – Componentes do turbocompressor analisado .....	50
Quadro 6 – Processos para a produção de turbocompressores.....	53

**LISTA DE SIGLAS**

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-C	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida
ACV-CO <sub>2</sub>	Avaliação das Emissões de Carbono do Ciclo de Vida
ACV-E	Avaliação Energética do Ciclo de Vida
AU	Artigos publicados por autores de destaque
CI	Artigos com alto índice corrigido de citação
DS	Desenvolvimento Sustentável
EE	Energia elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ET	Energia térmica
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IN	Artigos com origem em instituições de destaque
JCR	<i>Journal Citation Report</i>
OU	Outros – artigos selecionados por afinidade com o tema
PA	Artigos com origem em países de destaque
PE	Artigos publicados em periódicos de destaque
RE	Artigos recentes
SJR	<i>SCImago Journal Rank</i>
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
WoS	<i>ISI Web of Science</i>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo do tempo, as pessoas e organizações têm causado danos ao meio ambiente, relacionados à quantidade de resíduos gerados pelos processos produtivos e pela taxa de extração de recursos naturais, que excedem a capacidade de recuperação e regeneração da natureza (HILSDORF *et al.*, 2017).

O início das discussões em torno dos problemas ambientais se deu a partir da década de 1960, motivado pela industrialização e o potencial desequilíbrio entre o desenvolvimento humano e o meio ambiente (CHRISTOFI *et al.*, 2012). Devido à crescente preocupação com a preservação ambiental, surgiu o termo Desenvolvimento Sustentável (DS), que foi definido e difundido como “a habilidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987, p. 16).

O conceito de DS, apesar de enfrentar dificuldades de implementação até os dias atuais, foi difundido rapidamente, sendo criado, na década de 1990, o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*), com atuação global, e o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), como resposta do Brasil ao movimento global (VITERBO JUNIOR, 1998).

Em busca do DS, é importante a utilização de análises quantitativas para verificar a viabilidade ambiental de sistemas. Existem diversas métricas para quantificar os impactos ambientais de sistemas, porém a maioria dos casos leva em conta apenas o desperdício de massa. Neste sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta na análise dos aspectos ambientais em sistemas, considerando tanto o fluxo de massa, quanto de energia (SCHEEPENS *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2018).

Um dos fatores fundamentais a se considerar no DS é o consumo de energia. No que diz respeito aos impactos ambientais, a geração de eletricidade por termoelétricas é uma das maiores responsáveis pelas emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no mundo (ARANGO e LARSEN, 2010). Por outro lado, a energia consiste em uma necessidade básica para qualquer setor industrial, sendo assim um importante fator competitivo para o desenvolvimento econômico (CIACCO *et al.*, 2017).

Em alguns casos, o consumo de energia no processo de manufatura está diretamente associado à qualidade do produto. Assim, esforços para alteração dos parâmetros de produção e consequente redução no consumo de energia precisam ser direcionados de forma que as propriedades do produto não sejam alteradas (ZHU *et al.*, 2019).

Além de análises dos parâmetros de produção, outras estratégias de negócio são utilizadas pelas empresas para buscar redução no consumo de energia. A remanufatura representa um importante método para recuperação de valor dos produtos no fim de vida, resultando em menor demanda por matéria prima e energia (WANG *et al.*, 2018).

Sobre o consumo de energia no mundo, segundo o relatório da *International Energy Agency* (IEA) – Agência Internacional de Energia (2017), existe um crescimento contínuo, tendo os setores industriais e de transportes como os principais destaques, responsáveis por 37% e 29%, respectivamente, do consumo mundial em 2015.

O Brasil segue um comportamento similar e, apesar do consumo energético ter sofrido um decréscimo nos últimos anos por questões econômicas, a indústria possui a maior representatividade, seguida do setor de transportes (EPE, 2017). Dentre as atividades existentes no setor industrial, destaca-se a indústria automotiva, com mercados globais e redes complexas de suprimentos, implicando em uma grande relevância econômica e ambiental (HILSDORF *et al.*, 2017).



## **1.2. PROBLEMA DA PESQUISA**

A escassez de estudos sobre o consumo energético nos setores industriais pode constituir uma barreira para maior eficiência energética e Desenvolvimento Sustentável. Diante disso, a questão que norteia o desenvolvimento desta dissertação é:

- Como quantificar o consumo de energia em um sistema de manufatura, com base nos conceitos do ciclo de vida do produto?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desta dissertação é propor um guia para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, tendo como base a abordagem de ciclo de vida do produto.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como forma de alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as etapas necessárias para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura;
- Desenvolver uma sistemática para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura;
- Aplicar o guia proposto em um sistema de manufatura.

## **1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

O setor industrial passa por um processo contínuo para que os impactos ambientais sejam reduzidos, o que leva à crescente busca por maior eficiência

energética nas empresas de manufatura (DENG *et al.*, 2017). Segundo Yoon *et al.* (2014), a quantificação do consumo de energia é de grande relevância para a economia de energia e a manipulação desses dados de unidades de manufatura resulta em informações poderosas de comparação entre os diferentes processos.

Existem diversas oportunidades para melhoria no desempenho energético industrial, principalmente no segmento metalmecânico (MORADNAZHAD e UNVER, 2017), sendo que o entendimento por meio de estudos empíricos, de como ocorre o consumo energético nas indústrias, constitui um importante passo em busca de uma maior eficiência energética (LAZZARIN e NORO, 2015).

A utilização da abordagem de ACV com foco direcionado à análise do consumo de energia pode ser uma forma eficiente para o entendimento detalhado das etapas de um sistema produtivo, servindo cada vez mais como um dos fatores chave na gestão ambiental e DS (SONG *et al.*, 2009).

Para a aplicação do guia em um sistema de manufatura, o produto utilizado é o turbocompressor, que é um dispositivo essencial para maior eficiência energética em motores de combustão interna, utilizados principalmente em meios de transportes. Katsanos *et al.* (2013) afirmam que são desperdiçados aproximadamente 30-40% da energia consumida em motores a diesel, comumente utilizados como motores primários de veículos pesados, sendo que parte dessa energia pode ser recuperada por meio de turbocompressores.

No Brasil, onde o principal meio de transporte é rodoviário e a frota de veículos tem, na maior parte, mais de dez anos de uso, os turbocompressores possuem um papel relevante, permitindo uma repotencialização da frota, de forma a obter menor consumo de combustível e redução nas emissões de GEE (JUNIOR e GABRIEL, 2015).

Assim, assumindo a importância de estudos para quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, é pertinente o desenvolvimento de um

guia para quantificação e análise do consumo de energia ao longo dos processos de manufatura de turbocompressores.

### 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho segue uma estrutura com cinco capítulos, incluindo a Introdução, conforme representado de maneira simplificada pela Figura 1 e detalhado a seguir.

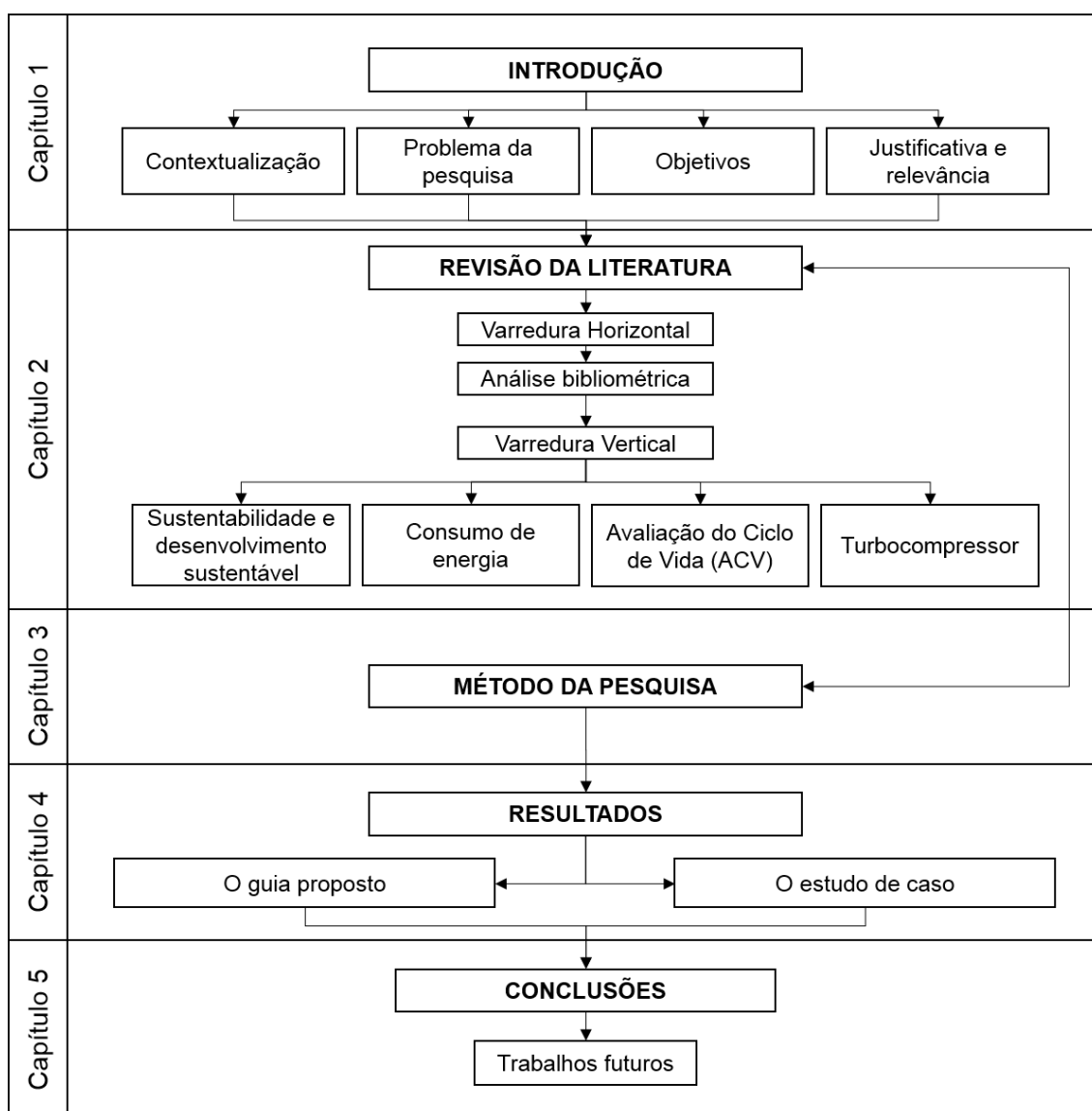


Figura 1 – Diagrama simplificado da estrutura do presente trabalho

O Capítulo 1 – Introdução – apresenta o contexto no qual o trabalho foi concebido, introduzindo a questão e objetivos da pesquisa, acompanhado de uma discussão acerca da justificativa e relevância dos temas abordados.

O Capítulo 2 – Revisão da literatura – busca um embasamento bibliográfico que permite entender os assuntos abordados pela pesquisa, conhecendo os limites do conhecimento, características da literatura, conceitos e definições pertinentes ao tema. Os tópicos abordados são: Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável; Consumo de energia; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); e Turbocompressores.

O Capítulo 3 – Método da pesquisa – descreve a classificação do presente trabalho quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos metodológicos. Além disso, são apresentadas as etapas de atividades para que os objetivos do trabalho sejam atingidos.

O Capítulo 4 – Resultados – apresenta o guia proposto e o desenvolvimento da aplicação em um sistema de manufatura, discutindo os resultados obtidos em relação ao processo e consumo de energia para a produção de turbocompressores.

O Capítulo 5 – Conclusões – apresenta uma síntese dos principais resultados e contribuições obtidas em comparação ao problema de pesquisa e objetivos inicialmente apresentados, bem como análise da eficiência do método utilizado e guia proposto. Finalmente, propostas para trabalhos futuros são apresentadas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta a revisão da literatura, tendo em vista que, uma vez determinado o tópico a ser estudado, esse é o primeiro passo para o desenvolvimento da pesquisa (CRESWELL, 2010).

A revisão da literatura, revisão bibliográfica, referencial teórico ou fundamentação teórica, deve analisar trabalhos previamente publicados que tenham relação com o tópico em estudo, realizando associações entre os trabalhos, de forma que contribuam para o desenvolvimento da pesquisa (TURRIONI e MELLO, 2012).

Assim, na presente pesquisa foi feita uma revisão seguindo a estrutura de processamento proposta por Levy e Ellis (2006), na qual o processo ocorre de forma científica e transparente, e a organização das informações conforme Miguel *et al.* (2012), dividindo entre uma varredura horizontal e, posteriormente, uma varredura vertical.

Foram utilizadas técnicas de análise bibliométrica como forma de rastrear e mapear literatura relevante no contexto do estudo, encontrando relações entre os elementos estruturais das publicações (ZUPIC e ČATER, 2015) e contribuindo para a organização da varredura horizontal da literatura. Foi utilizado o *software VOSviewer* na versão 1.6.6., de acesso livre, para construção e visualização de mapas bibliométricos, que contemplam os dados dos autores, periódicos, quantidade de citações, referências, palavras chaves, entre outros (VAN-ECK e WALTMAN, 2010).

Para a organização da varredura vertical da literatura, foram selecionados artigos com destaque a partir da análise bibliométrica, juntamente com outros documentos provenientes de pesquisas complementares, e analisados com maior profundidade.

## 2.1. PROTOCOLO PARA CONDUÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA

Conforme estabelecido por Levy e Ellis (2006), a revisão deve buscar a literatura a partir de critérios definidos (*inputs*) para que os documentos sejam analisados (processamento) e discutidos, formando os argumentos (*outputs*). Este subcapítulo visa explicitar os critérios utilizados como protocolo da revisão da literatura, resumido pelo fluxograma apresentado na Figura 2 e posteriormente detalhado.

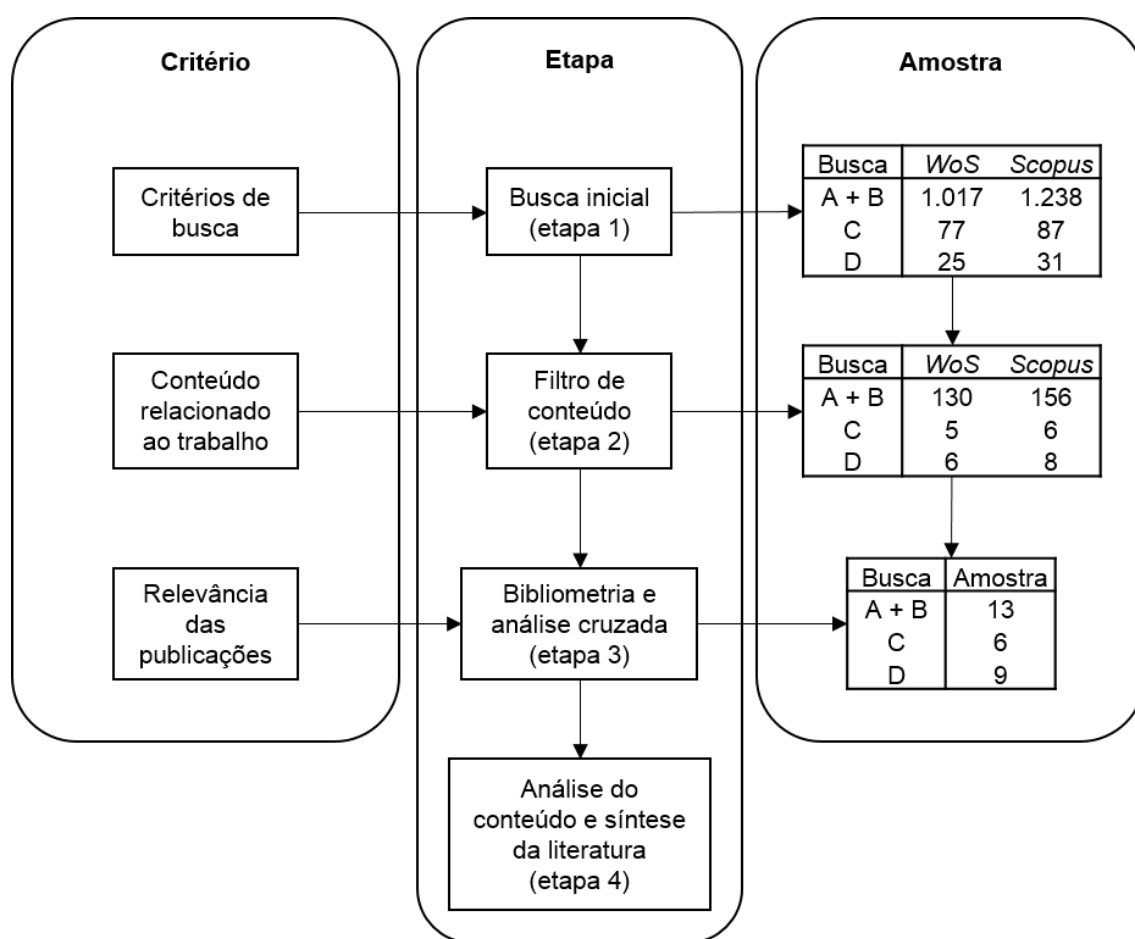


Figura 2 – Fluxograma da Revisão da Literatura  
Fonte: adaptado Mok *et al.* (2015)

Para a seleção das palavras-chave utilizadas na busca, foi considerada a questão-problema da pesquisa, de forma a identificar quatro conjuntos de palavras, conforme o Quadro 1, contendo as variações dos termos com o mesmo significado no contexto, tanto em português, quanto em inglês.

Quadro 1 – Conjuntos de palavras-chave utilizadas para *strings* de busca

<b>Conjuntos</b>	<b>Strings de busca</b>
<b>A – Energia</b>	" <i>energy consumption</i> " OR "consumo de energia" OR "consumo energético" OR " <i>energy balance</i> " OR "balanço energético" OR "balanço de energia" OR " <i>energy utilization</i> " OR "utilização de energia"
<b>B – Manufatura</b>	manufacturing OR production OR manufatura OR produção OR fabrication OR fabricação
<b>C – Avaliação Energética do Ciclo de Vida (ACV-E)</b>	" <i>life cycle energy assessment</i> " OR " <i>life cycle energy analysis</i> " OR "avaliação energética do ciclo de vida" OR "análise energética do ciclo de vida" OR "avaliação da energia do ciclo de vida" OR "análise da energia do ciclo de vida"
<b>D – Turbocompressor para veículos pesados</b>	( <i>turbocharger</i> * OR turboalimentador* OR turbocompressor*) AND ( <i>truck</i> * OR <i>bus</i> OR " <i>heavy vehicle</i> *" OR caminhão OR caminhões OR ônibus OR "veículos pesados" OR "veículo pesado")

Dessa forma, foram realizadas buscas nas bases de dados *ISI Web of Science* (*WoS*) e *Scopus*, por se tratarem de bases consolidadas no meio científico e com ampla cobertura (ZUPIC e ČATER, 2015). Na primeira etapa, os critérios utilizados na busca foram: apenas artigos; apenas idioma em inglês ou português; período a partir de 2007. Para o conjunto A, foram considerados apenas artigos que apresentam as palavras no título, enquanto para os conjuntos B, C e D, foram considerados no título, resumo e palavras-chave.

Quando os conjuntos de palavras de A e/ou B foram associados com os conjuntos C ou D, os resultados foram limitados ou inexistentes. Assim, optou-se por analisar o conteúdo de todos os artigos encontrados nas buscas iniciais do conjunto C e D, selecionando apenas os pertinentes, etapa 2, e excluindo os artigos duplicados nas duas bases, etapa 3.

Para a associação entre os conjuntos A e B, na etapa 2 foram analisados os títulos, resumo e palavras-chave dos artigos para aplicação do critério de exclusão, descartando artigos que, apesar de conter as palavras da busca, estão fora do contexto do trabalho.

Na terceira etapa, a amostra de publicações da etapa anterior foi analisada de forma quantitativa e estatística por meio de técnicas bibliométricas (ARAÚJO, 2006), evidenciando assim destaques da amostra em relação à origem, filiação, fonte, citações, cocitações e padrões do conteúdo. Assim, os artigos mais relevantes foram selecionados para a próxima etapa.

Finalmente, a quarta etapa tratou-se do *output* da revisão da literatura, em que os artigos selecionados foram analisados, fazendo associações entre seus conteúdos e as informações pertinentes extraídas e organizadas no texto, formando argumentos (LEVY e ELLIS, 2006).

## **2.2. VARREDURA HORIZONTAL**

Este subcapítulo apresenta uma análise horizontal da literatura relacionada com o tema da pesquisa, como forma de identificar as características gerais e as diferentes “tribos” da área (MIGUEL *et al.*, 2012).

### **2.2.1. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE AO CONSUMO DE ENERGIA EM MANUFATURA**

#### **2.2.1.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – *WEB OF SCIENCE***

A seguir, serão apresentados os resultados da análise bibliométrica conduzida na base *Web of Science* para estudos que abordam o consumo de energia em processos produtivos.

Observa-se, conforme a Figura 3, que, a partir da amostra com 130 artigos selecionados para análise (disponível no Apêndice A), existe um crescente volume de publicações por ano. Nos três primeiros anos da análise, a amostra se mantém inferior a cinco e cresce a partir de 2010, passando por uma queda de 2013 a 2015. O pico ocorre no ano de 2016, com 31 artigos, seguido de 2017, com 30 artigos.



Ainda referente ao crescente volume de publicações ao longo dos anos, a média de autores por publicação, bem como de referências por publicação, também apresenta uma tendência de crescimento.

Para a quantidade de publicações, ocorre a maior inclinação da linha de tendência, seguido pela média de referências por publicação e, por fim, a média de autores por publicação, com pouca tendência de crescimento. Dessa forma, é possível indicar que a área está em crescimento.

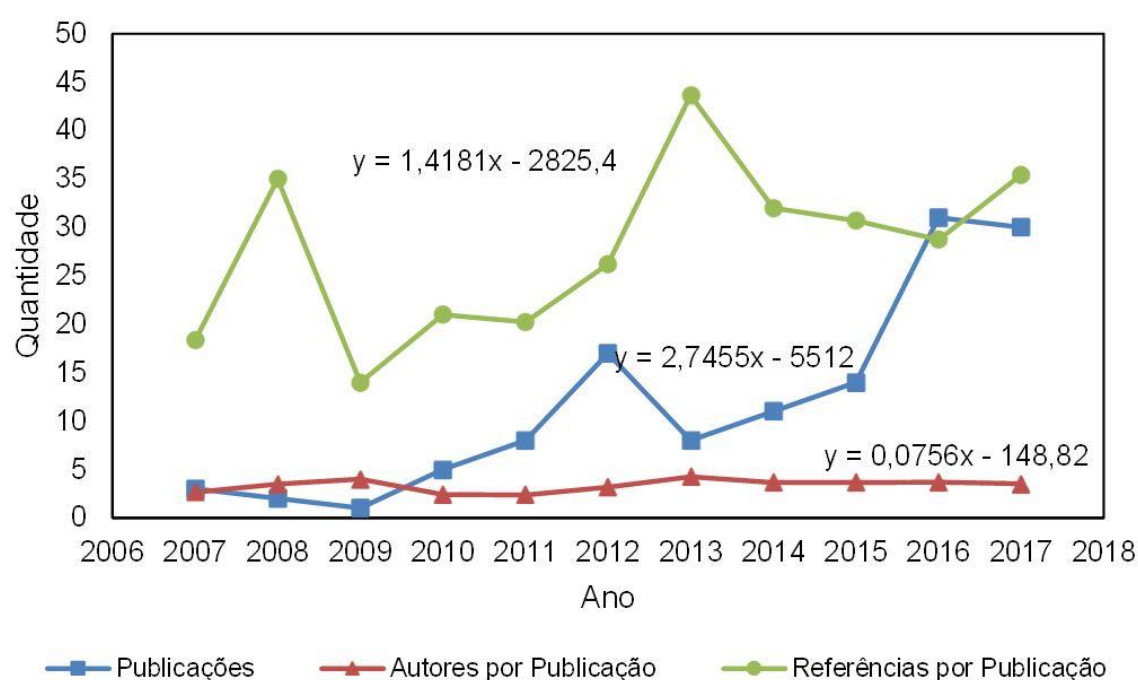


Figura 3 – Quantidade de publicações por ano na *Web of Science*

Ao analisar os assuntos abordados nos artigos, é possível observar que a maior parte é voltada para modelos de monitoramento do consumo de energia (HU *et al.*, 2017) e otimização do consumo em processos de manufatura (LI *et al.*, 2017).

As aplicações dos estudos analisados ocorrem em diversos segmentos industriais, como metalúrgico (DENG *et al.*, 2017; MORADNAZHAD e UNVER, 2017), têxtil (RAKIB *et al.*, 2017; SHEN *et al.*, 2017), cerâmico (CHUENWONG

*et al.*, 2017; CIACCO *et al.*, 2017), mineração (HOLMBERG *et al.*, 2017) e alimentício (SALEH *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017).

Na sequência, a amostra é analisada quanto à origem dos artigos, tanto de filiação, representada pela Figura 4, quanto geográfica, representada pela Tabela 1.

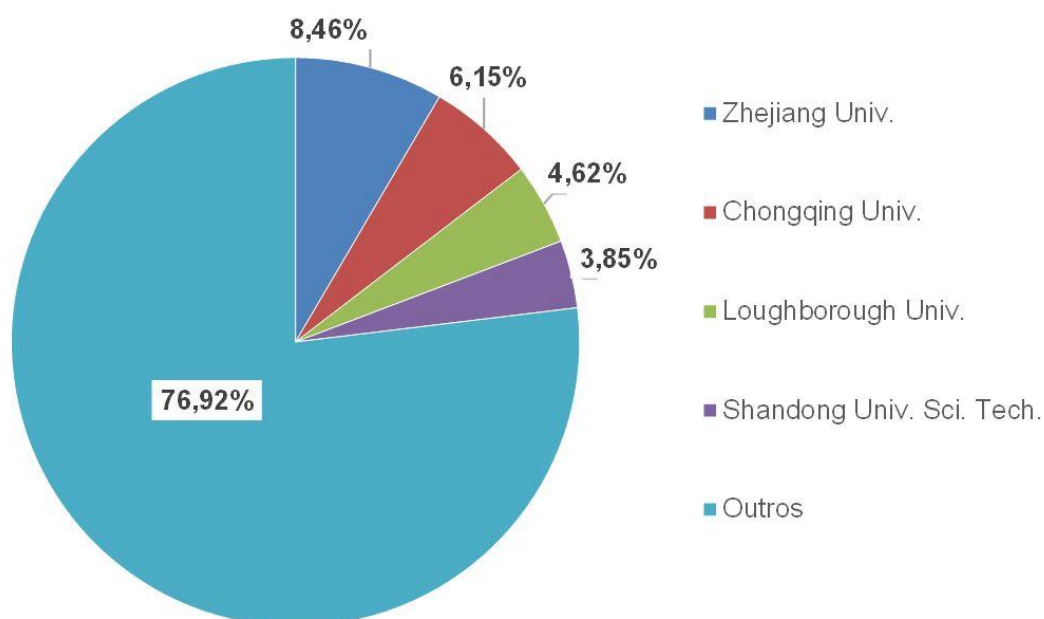


Figura 4 – Distribuição da amostra por filiação na *Web of Science*

Para a filiação, foram encontradas 176 instituições diferentes, de forma que os resultados se mostram dispersos. Foi possível encontrar um destaque, mesmo que pouco representativo, para quatro instituições, das quais três são localizadas na China.

A principal instituição é a *Zhejiang University*, com 11 artigos, seguido da *Chongqing University*, com oito artigos, ambas na China. Em terceiro lugar, com seis artigos na amostra, aparece a *Loughborough University* no Reino Unido, enquanto o quarto lugar volta a ser ocupado por uma instituição chinesa, a *Shandong University of Science and Technology*, com cinco artigos na amostra. As demais 172 instituições aparecem com pouca representatividade, cada uma possuindo três ou menos artigos na amostra.

A partir da análise de filiação e origem geográfica, observa-se que as regiões onde as principais instituições estão localizadas também estão entre as principais regiões da amostra. A China se destaca estando presente em 48 artigos, seguido dos Estados Unidos e Turquia.

Tabela 1 – Distribuição da amostra por origem geográfica na *Web of Science*

Nome do país	Quantidade de publicações	Presença na amostra (%)
China	48	36,92%
Estados Unidos	23	17,69%
Turquia	15	11,54%
Reino Unido	8	6,15%
Irã	6	4,62%
Itália	6	4,62%
Austrália	5	3,85%
Outros	58	44,62%

Quando a análise é voltada para a fonte de publicação, a Figura 5 mostra os quatro principais periódicos, que juntos representam mais de 35% da amostra, a quantidade de artigos em cada um e a sua distribuição ao longo dos anos. O conjunto dos quatro principais periódicos apresenta um crescimento similar as publicações de maneira geral, atingindo o pico nos anos de 2016 e 2017.

O principal periódico da amostra é o *Journal of Cleaner Production* e, com um total de 24 artigos, apresenta crescimento nos últimos anos, assim como o *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, com um total de 10 artigos. Por outro lado, o periódico *Energy* possui a maior parte das suas publicações concentrada entre os anos de 2010 e 2012.

Em relação ao fator de impacto desses periódicos, segundo o *Journal Citation Report – JCR 2016*, o *Journal of Cleaner Production* possui o maior índice (5,715), seguido do *Energy* (4,520), *Applied Thermal Engineering* (3,356) e *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2,209), respectivamente.

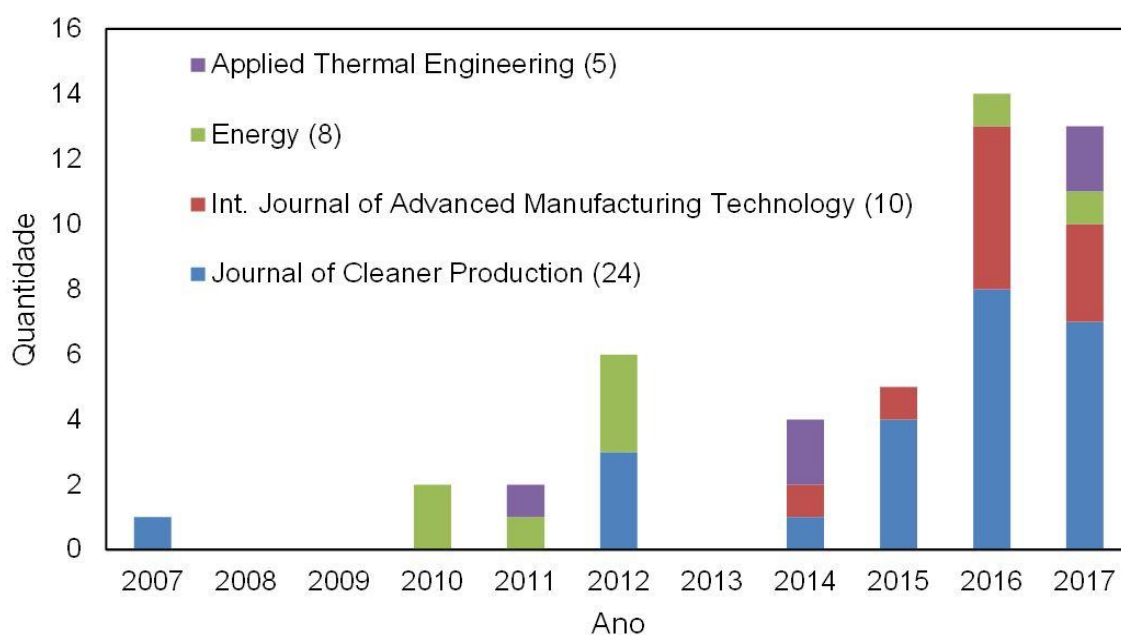


Figura 5 – Quantidade anual de artigos entre os principais periódicos na *Web of Science*

Por meio de uma análise de cocitação, na qual os autores mais citados pelos 130 artigos da amostra são considerados, foram encontrados 2.763 autores diferentes. A análise feita pelo *software* VOSviewer considera que os autores citados pelo mesmo artigos possuem uma ligação e os conjuntos dessas ligações formam diferentes correntes de autores.

A Figura 6 ilustra as redes formadas pelos autores que foram citados pelo menos 10 vezes dentro da amostra, resultando em um total de 31 autores divididos em três correntes diferentes, distintas por cores e listados juntamente com a quantidade de citações na Tabela 7 do Apêndice B. Em relação à relevância dos autores, quanto maior a circunferência, maior a quantidade de citações.

A corrente principal representada pela cor vermelha possui 15 autores e indica que a força de ligação entre esses autores é mais intensa do que nas demais correntes. Os autores dessa corrente trabalham com temas relacionados à tomada de decisão para diferentes estratégias de manufatura, principalmente usinagem, com foco na eficiência energética.

A segunda corrente, representada pela cor verde, é composta por 11 autores, cujos trabalhos são similares aos autores da primeira corrente, porém com o foco voltado para a simulação do consumo energético nos processos. Finalmente, a terceira corrente é a menos representativa e formada por apenas cinco autores, aparecendo principalmente relatórios e estudo sobre políticas energéticas.

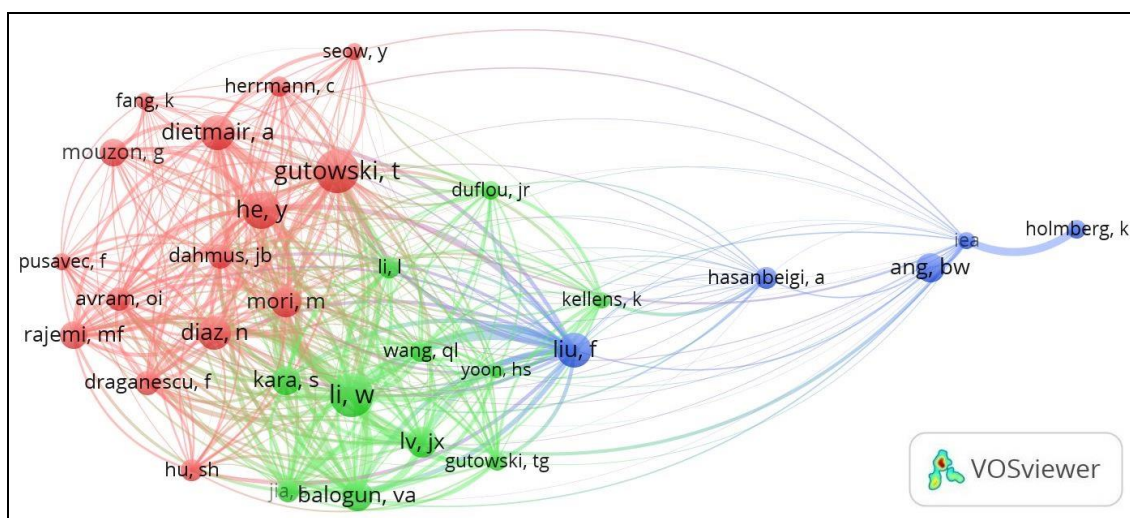


Figura 6 – Mapa de rede dos principais autores cocitados na *Web of Science*

A Tabela 2 apresenta os cinco artigos com maior índice corrigido de citação, obtido pela multiplicação entre a quantidade de citações do artigo e a soma de uma unidade com o fator de impacto do periódico, segundo o *JCR 2016* (LOPES e CARVALHO, 2012).

O artigo “*Unit process energy consumption models for material removal process*” (KARA e LI, 2011) apresenta um modelo para predição do consumo de energia em processos de remoção de material de acordo com os parâmetros utilizados na máquina-ferramenta, contribuindo para melhoria das etapas de desenvolvimento de produtos e planejamento do processo.

O segundo artigo em índice corrigido de citação, “*Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs*” (SHROUF *et al.*, 2014), propõe um modelo matemático como forma de reduzir

o custo total de produção por meio de programação energeticamente eficiente, considerando a variação de preço da energia ao longo do dia.

Tabela 2 – Os artigos com maior índice de citação corrigido na *Web of Science*

Autor (es)	Citações	Periódico	JCR	Índice corrigido de citação
KARA, S.; LI, W.	186	CIRP Annals – Manufacturing Technology	2,893	724,098
SHROUF, F.; ORDIERES-MERE, J.; GARCIA-SANCHEZ, A.; ORTEGA-MIER, M.	88	Journal of Cleaner Production	5,715	590,920
MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B.; TWOMEY, J.	154	International Journal of Production Research	2,325	512,050
CHEN, W.; YIN, X.; MA, D.	59	Applied Energy	7,182	482,738
XU, J.; FLEITER, T.; EICHAMMER, W.; FAN, Y.	92	Energy Policy	4,140	472,880

No mesmo sentido, Mouzon *et al.* (2007) propõem um método operacional para economia de energia baseado no desligamento automático de máquinas não gargalo em períodos ociosos, como apresentado no artigo “*Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment*”.

Por outro lado, o artigo “*A bottom-up analysis of China’s iron and steel industrial energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions*” (CHEN *et al.*, 2014) apresenta uma perspectiva do futuro cenário na indústria de ferro e aço na China, analisando os impactos no consumo e eficiência energética do setor. Similarmente, o artigo “*Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China’s cement industry: a perspective from LMDI decomposition analysis*” (XU *et al.*, 2012) analisa os fatores que influenciaram nas variações do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> entre os anos de 1990 e 2009 na China.

### 2.2.1.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA – SCOPUS

O resultado da análise bibliométrica de publicações na base de dados *Scopus* que aborda o consumo de energia em processos produtivos é apresentado a

seguir. A amostra de 156 artigos selecionados para análise (disponível no Apêndice A) apresenta um crescimento na quantidade de publicações por ano, conforme ilustra a Figura 7. O pico na quantidade de publicações ocorre em 2016, com um total de 31 artigos, seguido de 2017, com 28 artigos.

Observa-se também uma tendência de crescimento na média de referências utilizadas nos artigos ao longo dos anos, apesar de a maior média de referências por artigo ocorrer no ano de 2009. Da mesma forma, a média de autores por artigo apresenta-se praticamente constante ao longo dos anos.

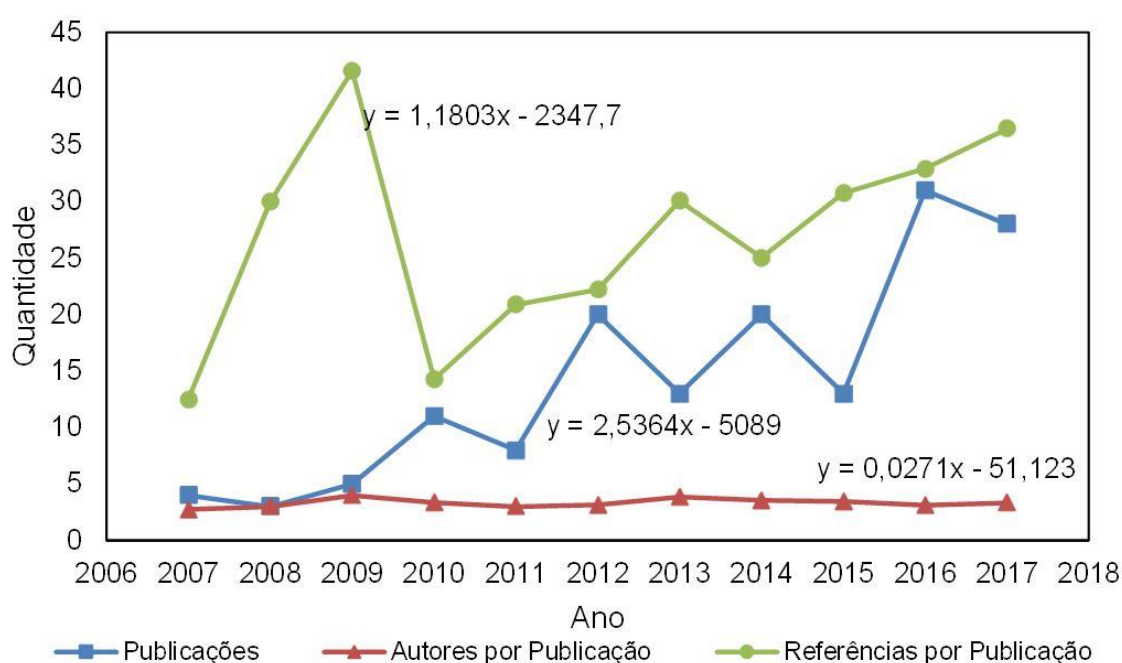


Figura 7 – Quantidade de publicações por ano na *Scopus*

Ao buscar pela distribuição de origem de filiação, existe grande quantidade de instituições nas quais os autores da amostra são filiados. A Figura 8 ilustra como ocorre a distribuição da amostra por filiação, sendo possível destacar apenas quatro instituições, que correspondem à 20,51% da amostra, sendo o restante das instituições correspondentes à uma pequena parcela.

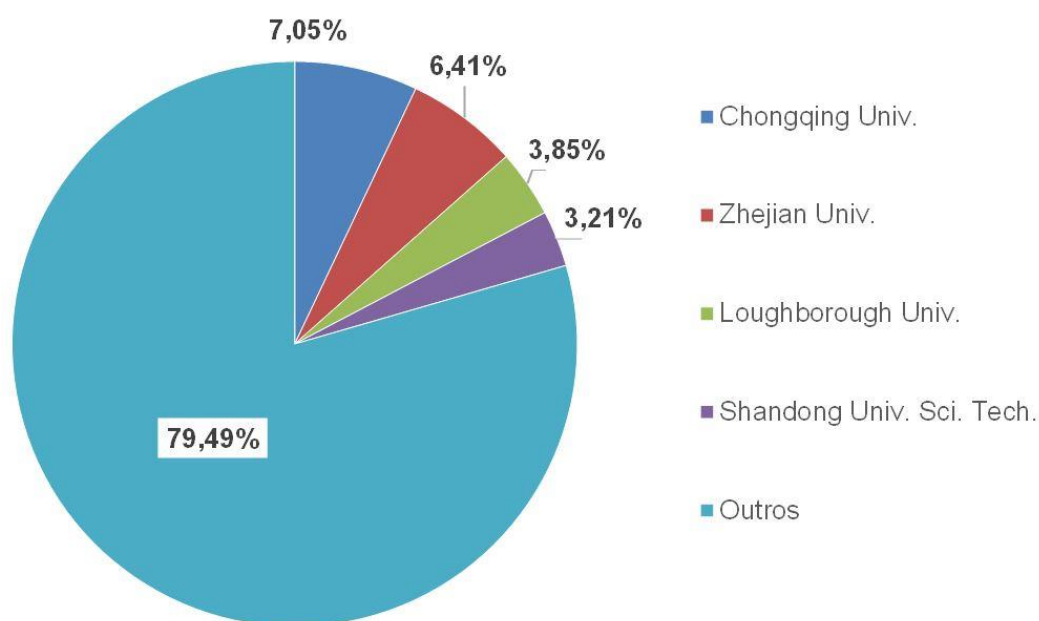


Figura 8 – Distribuição da amostra por filiação na *Scopus*

Para a distribuição de origem geográfica, a Tabela 3 apresenta os países de origem dos autores, destacando a China com a maior representatividade, presente em 33,97% dos artigos da amostra.

Tabela 3 – Distribuição da amostra por origem geográfica na *Scopus*

Nome do país	Quantidade de publicações	Presença na amostra (%)
China	53	33,97%
Estados Unidos	27	17,31%
Reino Unido	16	10,26%
Turquia	14	8,97%
Itália	10	6,41%
Alemanha	9	5,77%
Outros	74	47,44%

Em relação à fonte das publicações, observa-se grande quantidade de periódicos diferentes, sendo possível destacar os quatro principais da amostra, conforme ilustrado na Figura 9.



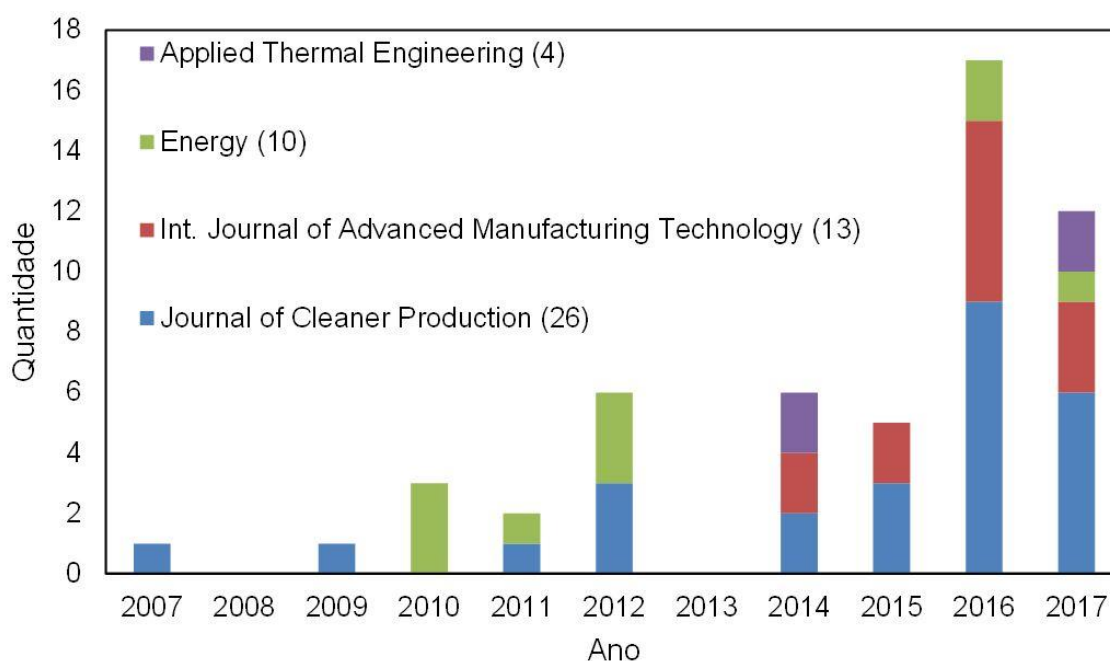


Figura 9 – Quantidade anual de artigos entre os principais periódicos na *Scopus*

Para a análise do fator de impacto na base de dados *Scopus*, foi utilizado o índice *SCImago Journal Rank – SJR 2016*. Dentre os quatro principais periódicos, o *Energy* aparece com maior índice (1,999), seguido do *Journal of Cleaner Production* (1,615), *Applied Thermal Engineering* (1,462) e *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (0,967).

Na análise de cocitação foram citados pelos artigos da amostra um total de 6.068 autores diferentes, sendo considerados para a elaboração do mapa de rede apenas os 31 autores que possuem no mínimo 27 citações. A Figura 10 ilustra as correntes formadas por esses autores (listados juntamente com a quantidade de citações na Tabela 8 do Apêndice B).

A corrente principal representada pela cor vermelha possui um grupo de 13 autores, sendo o principal o Sami Kara da *University of New South Wales – Austrália*, enquanto na segunda corrente, cor verde, é formada por um grupo de 12 autores e se destaca o Fei Liu da *Chongqing University – China*. A terceira corre, cor azul, é menos representativa com 6 autores.

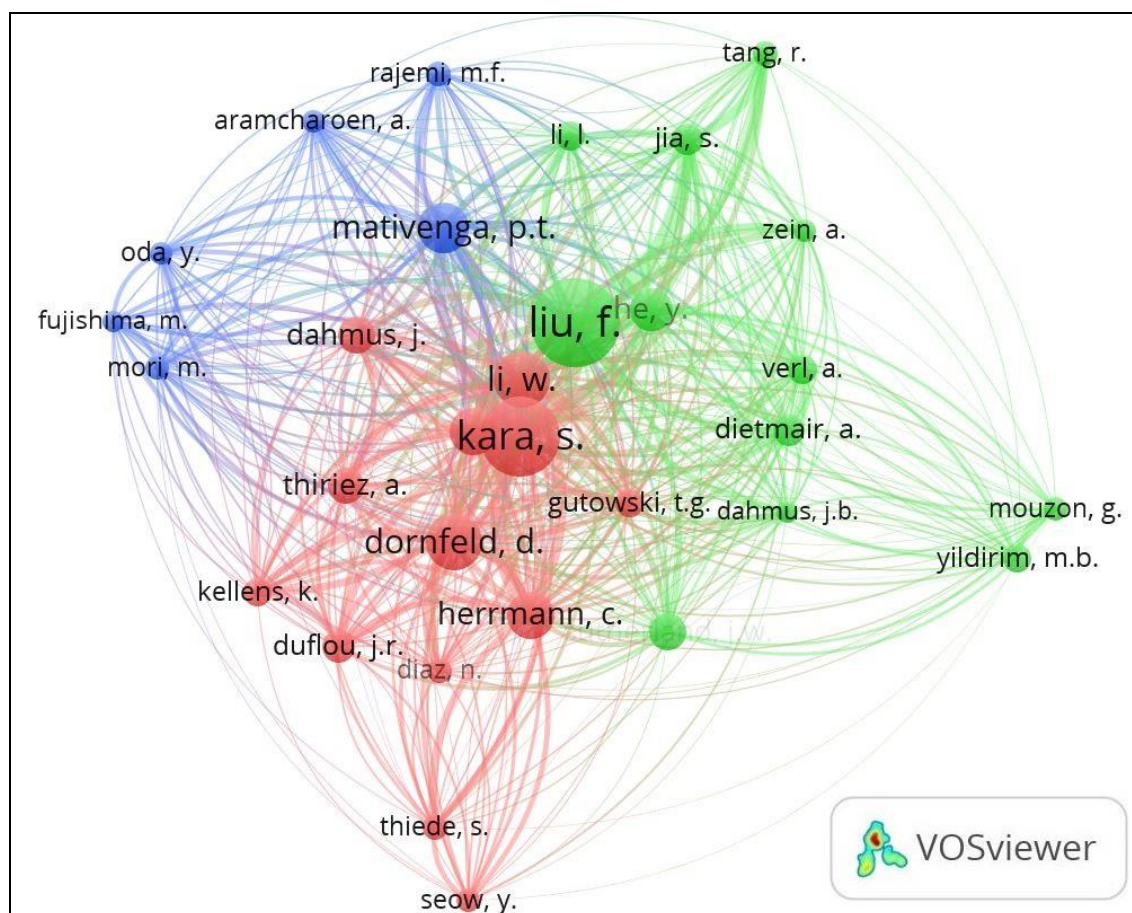


Figura 10 – Mapa de rede dos principais autores cocitados na *Scopus*

Para o índice corrigido de citações (LOPES e CARVALHO, 2012), a Tabela 4 apresenta os cinco principais artigos da amostra, considerando o fator de impacto do periódico segundo o *SCImago Journal Rank – SJR 2016*.

Dentre os cinco artigos com maior índice corrigido de citações na base de dados *Scopus*, apenas o quinto não aparece na análise conduzida anteriormente na base de dados *Web of Science*.

O artigo intitulado “*Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China*” (GUO e FU, 2010) apresenta uma análise da evolução nos últimos anos no cenário energético da indústria de ferro e aço na China, possibilitando fazer recomendações e contribuir para um melhor entendimento dos aspectos dessa indústria.

Tabela 4 – Os artigos com maior índice de citação corrigido na *Scopus*

Autor (es)	Citações	Periódico	SJR	Índice corrigido de citação
KARA, S.; LI, W.	223	CIRP Annals – Manufacturing Technology	1,672	595,856
MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B.; TWOMEY, J.	205	International Journal of Production Research	1,463	504,915
XU, J.; FLEITER, T.; EICHAMMER, W.; FAN, Y.	99	Energy Policy	2,197	316,503
SHROUF, F.; ORDIRESMERE, J.; GARCIA-SANCHEZ, A.; ORTEGAMIER, M.	109	Journal of Cleaner Production	1,615	285,035
GUO, Z. C.; FU, Z. X.	88	Energy	1,999	263,912

### 2.2.1.3. ANÁLISE CRUZADA: *WEB OF SCIENCE* E *SCOPUS*

A partir do cruzamento das análises conduzidas para os artigos de consumo de energia em processos produtivos, observa-se similaridade nos destaques encontrados em ambas as bases, a começar pela evolução do assunto ao longo dos anos. Em ambas as análises se constatam um crescimento na quantidade de publicações por ano, bem como na quantidade média de referências por artigo. O pico das publicações está concentrado nos anos mais recentes, entre 2016 e 2017.

Em relação a origem, os principais países encontrados como destaque são a China, Estados Unidos, Turquia e Reino Unido. Para as instituições, os resultados principais nas duas bases apontam as instituições *Zhejiang University*, *Chongqing University*, *Shandong University of Science and Technology* (China) e *Loughborough University* (Reino Unido).

Da mesma forma, os principais periódicos se repetem em ambas as análises, sendo eles o *Journal of Cleaner Production*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *Energy* e *Applied Thermal Engineering*. Para os principais autores cocitados, a divisão das correntes de autores possui características diferentes nas duas bases devido a variações na quantidade de citações, porém alguns autores são destaques em ambas as análises.

Finalmente, com base nos destaques encontrados na literatura, o

Quadro 2 apresenta os artigos selecionados para construção do referencial teórico, bem como os critérios de seleção contemplados por cada um deles.

Para a seleção dos artigos, houve uma priorização para os trabalhos recentes, com maior índice corrigido de citação, publicados nos principais periódicos e pelos autores mais cocitados, dos principais países e instituições. Ainda, artigos não contemplados nas buscas conduzidas foram adicionados por contribuir com o tema em estudo.

Quadro 2 – Artigos para o referencial teórico de consumo de energia em manufatura

Artigo	Recente	Citação	Periódicos	Autores	Principais	Instituições	Outros
Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles (WANG <i>et al.</i> , 2017)	X		X		X		
Energy consumption characteristics of turn-mill machining (MORADNAZHAD e UNVER, 2017)	X		X		X		
Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption (DENG <i>et al.</i> , 2017)	X		X		X		
The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil (CIACCO <i>et al.</i> , 2017)	X		X				
A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling (ZHANG <i>et al.</i> , 2016)	X		X		X	X	
A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO <sub>2</sub> emissions (CHEN <i>et al.</i> , 2014)		X			X		
Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs (SHROUF <i>et al.</i> , 2014)		X	X				
Prospective scenarios on energy efficiency and CO <sub>2</sub> emissions in the European Iron & Steel industry (PARDO e MOYA, 2013)							X
Energy consumption and CO <sub>2</sub> emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis (XU <i>et al.</i> , 2012)		X			X		
A review on energy saving strategies in industrial sector (ABDELAZIZ <i>et al.</i> , 2011)							X
Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems (KARA e LI, 2011)		X		X			
Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China (GUO e FU, 2010)		X	X		X		
Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment (MOUZON <i>et al.</i> , 2007)		X		X	X		

No que diz respeito ao assunto, quatro dos artigos selecionados abordam o monitoramento do consumo de energia em processos produtivos, outros quatro visam a otimização dos processos para maior eficiência energética e os cinco restantes são relacionados à assuntos diversos, como análises históricas do consumo e perspectivas para a demanda por energia na indústria.

### 2.2.2. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE À AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA

A partir das buscas conduzidas para literatura de Avaliação Energética do Ciclo de Vida (ACV-E) e leitura do título e resumo, o Quadro 3 apresenta os artigos selecionados para uma análise mais profunda.

Os seis artigos selecionados foram publicados em diferentes periódicos, relacionados com energia, produção limpa, sustentabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida. A maior parte dos artigos encontrados na busca inicial é relacionada com o setor de construção, porém, para a seleção da amostra final, foram priorizados os artigos que poderiam contribuir para aplicações em produtos.

Quadro 3 – Artigos para o referial teórico de Avaliação Energética do Ciclo de Vida (ACV-E)

Artigo	Web of Science	Scopus
Life cycle energy assessment of a typical marble processing plant (PRAJWAL <i>et al.</i> , 2019)		X
Application of life cycle energy analysis for designing a water distribution network (LEE <i>et al.</i> , 2018)	X	X
Life cycle energy assessment of standby diesel generator set (BENTON <i>et al.</i> , 2017)	X	X
A life cycle energy assessment for biogas energy in Serbia (CVETKOVIĆ <i>et al.</i> , 2016)	X	X
A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “My house my life” (PAULSEN e SPOSTO, 2013)	X	X
Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites (SONG <i>et al.</i> , 2009)	X	X

### 2.2.3. REFERENCIAL TEÓRICO REFERENTE AOS TURBOCOMPRESSORES

A partir das buscas e seleção dos artigos nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, o Quadro 4 apresenta os artigos selecionados que foram analisados com maior profundidade e que contribuíram para o referencial teórico de Turbocompressores para Veículos Pesados.

Quadro 4 – Artigos para o referencial teórico de Turbocompressores para Veículos Pesados

Artigo	Web of Science	Scopus
Improving Fuel Economy and Acceleration by Electric Turbocharger Control for Heavy Duty Long Haulage (EKBERG e ERIKSSON, 2017)		X
Failure analysis in aluminium turbocharger wheels (MOREIRA, 2016)	X	X
An analysis of the influence of the Titanium compressor wheel on the dynamical properties of the particular turbocharger rotor (SMOLÍK <i>et al.</i> , 2015)		X
An analysis of the influence of the Titanium compressor wheel on the dynamical properties of the particular turbocharger rotor (WOHR <i>et al.</i> , 2015)	X	
Steady State Engine Test Demonstration of Performance Improvement With an Advanced Turbocharger (SUN <i>et al.</i> , 2014)	X	X
Flow effects due to pulsation in an internal combustion engine exhaust port (SEMLITSCH <i>et al.</i> , 2014)	X	X
Simulation of a heavy-duty diesel engine with electrical turbocompounding system using operating charts for turbocharger components and power turbine (KATSANOS <i>et al.</i> , 2013)	X	X
Causes of automotive turbocharger faults (FILIPCZYK, 2013)		X
A Study on an Automatically Variable Intake Exhaust Injection Timing Turbocharging System for Diesel Engines (YANG <i>et al.</i> , 2010)	X	X

Ao todo foram selecionados nove artigos, sendo a maioria entre os anos de 2013 e 2015. Dentre a amostra selecionada, dois artigos são de autores dos Estados Unidos e outros dois da Suécia, sendo o restante dos artigos de países diversos, como Brasil e Alemanha. Os principais periódicos da amostra

são o *Energy Conservation and Management* e o *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.

Em relação aos assuntos abordados, são encontrados artigos que tratam das falhas e desgastes (FILIPCZYK, 2013; MOREIRA, 2016), materiais utilizados (SMOLÍK *et al.*, 2015) e maior eficiência energética (EKBERG e ERIKSSON, 2017; SUN *et al.*, 2014), porém todos voltados para o produto e nenhum para os processos de produção.

### **2.3. VARREDURA VERTICAL**

A etapa de varredura vertical visa a aprofundar na literatura de forma a entender os conceitos desenvolvidos e as suas relações com a presente pesquisa (MIGUEL *et al.*, 2012).

#### **2.3.1. SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

As discussões acerca dos impactos ambientais fazem parte das principais questões da atualidade e estão diretamente relacionadas às atividades do ser humano, decorrente de fatores como o de estilo de vida que aumenta a demanda por energia (SANQUIST *et al.*, 2012) ou pelo sistema de produção com elevada extração de recursos naturais e geração de resíduos (CASTELLANI *et al.*, 2015).

A evolução da preocupação ambiental faz parte de um processo de conscientização decorrente de diversos eventos até o estado atual. Um dos primeiros eventos científicos voltados para discussões sobre as questões ambientais ocorreu em 1968 e ficou conhecido como Conferência da Biosfera, tendo como tema central o uso racional dos recursos e conservação da biosfera (UNESCO, 1968).

Alguns anos depois, decorrente da crise do petróleo em 1973, a comunidade internacional despertou um especial interesse pelas reduções das emissões por meio de pesquisas para desenvolvimento de biocombustíveis, pois, além

das questões ambientais, havia o receio da escassez do principal combustível fóssil (CARVALHO *et al.*, 2015).

Em 1987 foi publicado o Relatório de Brundtland intitulado “Nosso Futuro Comum” (*Our Common Future*), que trouxe a definição do conceito de DS como o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades (BRUNDTLAND, 1987).

Apesar da definição proposta no Relatório de Brundtland ser aceita até a atualidade, o conceito de DS é amplo e de difícil aplicação efetiva nas empresas (GIMENEZ *et al.*, 2012). Surge então o conceito de Tripé da Sustentabilidade (*Triple Bottom Line*) como uma forma de sistematizar a aplicação do DS, considerando simultaneamente o balanço econômico, ambiental e social de um sistema (ELKINGTON, 1998).

Dado o amadurecimento das atividades relacionadas ao DS, cresce também as teorias e conceitos para a promoção de sistemas mais sustentáveis, como a Produção Mais Limpa (P+L) e a Economia Circular (LOISEAU *et al.*, 2016). No mesmo sentido, ferramentas de monitoramento e gerenciamento do DS ganham notoriedade, tendo como uma das principais a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV (ROBERT *et al.*, 2002).

Além disso, existem instituições voltadas para a promoção do DS, como no caso do CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, atuando na formulação de relatórios, projetos e articulação entre governo e sociedade civil.

Em um relatório sobre consumo de energia, no sentido de contribuir com o DS no Brasil, o CEBDS afirma que aumentar a eficiência energética é mais barato do que investir na expansão de novas fontes de energia. Além disso, o relatório apresenta um panorama da eficiência energética no Brasil, bem como um plano de ação a ser executado nos níveis do Governo Federal, Governo Estadual, Empresas e População (CEBDS, 2016).



### 2.3.2. CONSUMO DE ENERGIA

A energia é considerada uma necessidade básica para o desempenho econômico de todos os países, seja ele desenvolvido, emergente ou industrializado. Segundo Alam *et al.* (2016), o consumo de energia no processo de produção é considerado como uma pré-condição para o DS.

São significantes os desafios relacionados ao consumo de energia, em que o crescimento econômico e populacional aumenta a demanda por energia, enquanto as mudanças climáticas e objetivos sociais dificultam o alcance dos níveis de fornecimento satisfatórios para garantir a manutenção da qualidade de vida (ANSAR *et al.*, 2014; SANQUIST *et al.*, 2012).

Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia – IEA (2017), representado na Figura 11, o consumo de energia no mundo cresceu mais do que o dobro entre os anos de 1971, com 4,244 Gtep, e 2015, com 9,384 Gtep. Nesse mesmo período, a distribuição do consumo por setor não apresentou alteração significativa, sendo o setor industrial responsável por 37% do total consumido no ano de 2015, seguido do setor de transportes (29%), residencial (22%) e os demais setores, como comércio, serviços públicos e agricultura, com 12%.

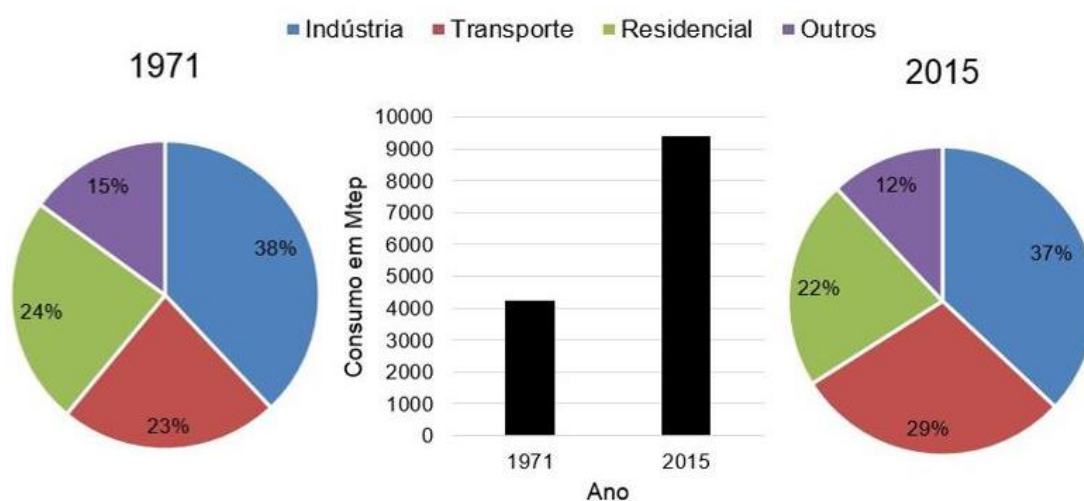


Figura 11 – Evolução do consumo de energia por setor no mundo  
Fonte: IEA (2017)

Para o fornecimento no consumo mundial, a fonte de energia primária predominante é o petróleo, seguido de carvão mineral e gás natural. Outras fontes de energia apresentam um crescimento nos últimos anos, porém ainda pouco representativo na matriz energética mundial (IEA, 2017). No Brasil, em 2016, as principais fontes da matriz energética foram petróleo, biomassa e hidráulica, respectivamente (EPE, 2017).

Em relação ao consumo no Brasil, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (2017), o pico ocorreu em 2014 (266 Mtep) e sofreu redução nos anos seguintes, com um consumo de 255,4 Mtep em 2016. Tal consumo é destinado principalmente para a indústria e transporte, representando juntos dois terços do total consumido no país.

Estimativas apontam para um crescimento no consumo de energia no Brasil, a tendência é que a demanda brasileira total de energia aumente mais de duas vezes até o ano de 2050 (EPE, 2016). Para as fontes de energia, investimentos estão sendo realizados para aumento das fontes renováveis, como a eólica (JUÁREZ *et al.*, 2014), porém a utilização de fontes não-renováveis também devem avançar (EPE, 2016).

No que diz respeito às estimativas para a distribuição do consumo pelos setores, deve ocorrer a manutenção do setor industrial como o principal consumidor e uma retração para os setores de transporte, decorrente de alterações nos modais de transporte e maior eficiência dos veículos, e residencial, principalmente pela substituição das fontes de energia (EPE, 2016).

No desenvolvimento do trabalho, a quantificação do consumo de energia será dividida entre energia elétrica e energia térmica. Para o conceito de energia elétrica, temos que é geração de diferença de potencial elétrico entre dois pontos, estabelecendo uma corrente elétrica capaz de operar equipamentos (GUSSOW, 2009).

Como conceito de energia térmica, será considerada a queima de combustível (tanto renovável, quanto não renovável) para geração de calor dentro do sistema produtivo, independente da finalidade, como realizado por Ciacco *et al.* (2017).

### 2.3.2.1. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA NAS INDÚSTRIAS

O setor industrial, como principal consumidor de energia, apresenta grandes possibilidades de análises e melhoria na eficiência energética. Para melhor entendimento do setor, a Tabela 5 apresenta o consumo e a representatividade dos diferentes segmentos industriais do Brasil.

Tabela 5 – Evolução do consumo energético industrial no Brasil

Segmento industrial	2010 (10 <sup>3</sup> Tep)	2012 (10 <sup>3</sup> Tep)	2014 (10 <sup>3</sup> Tep)	2016 (10 <sup>3</sup> Tep)
<b>Metalúrgica</b>	<b>27.814 (32,5%)</b>	<b>28.776 (32,4%)</b>	<b>27.792 (31,8%)</b>	<b>24.549 (29,2%)</b>
Alimentos e bebidas	23.244 (27,2%)	24.123 (27,2%)	22.238 (25,5%)	23.531 (28,0%)
Papel e celulose	10.131 (11,8%)	10.003 (11,3%)	11.173 (12,8%)	12.382 (14,7%)
Química	7.214 (8,4%)	7.237 (8,2%)	6.708 (7,7%)	3.743 (8,0%)
Cerâmica	4.485 (5,2%)	4.803 (5,4%)	5.079 (5,8%)	4.272 (5,1%)
Cimento	4.255 (5,0%)	5.135 (5,8%)	5.338 (6,1%)	4.271 (5,1%)
Têxtil	1.212 (1,4%)	1.116 (1,3%)	1.017 (1,2%)	842 (1,0%)
Outros	7.211 (8,4%)	7.504 (8,5%)	8.014 (9,2%)	7,592 (9,0%)
<b>Total</b>	<b>85.567 (100%)</b>	<b>88.697 (100%)</b>	<b>87.358 (100%)</b>	<b>84.183 (100%)</b>

Fonte: EPE (2017)

Observa-se que o consumo total de energia pelo setor industrial apresenta um crescimento, seguido de redução nos anos de 2014 e 2016, resultante da retração econômica do país e não por melhor eficiência energética. Da mesma forma, o segmento industrial metalúrgico apresenta similar redução no consumo, entretanto, mantém-se com a maior representatividade em todos os anos da análise.

Várias estratégias podem ser aplicadas nas indústrias em busca de economia de energia, seja por avanços tecnológicos, desenvolvimento de políticas ou por

decisões gerenciais. O gerenciamento energético expandiu pelas indústrias e tem se mostrado vital para o sucesso em muitos setores, sendo que na maioria dos casos as estratégias são ambientalmente e economicamente viáveis (ABDELAZIZ *et al.*, 2011).

Alguns estudos acadêmicos e análises de segmentos foram desenvolvidos para contribuir com uma maior eficiência industrial. No segmento da indústria de cimento, XU *et al.* (2012) apontaram os principais fatores responsáveis pelas mudanças no consumo de energia na China. Enquanto no setor de ferro e aço, que demonstra melhoria na eficiência energética há alguns anos (GUO e FU, 2010), as pesquisas de Chen, Yin e Ma (2014) na China e Pardo e Moya (2013) na Europa, apontam para uma redução ainda maior no consumo de energia para esse segmento nas próximas décadas.

Em um contexto específico, os estudos sobre consumo de energia nas indústrias ocorrem em três diferentes níveis: o nível da máquina (considera uma máquina específica ou um de seus componentes); do processo (considera um conjunto de máquinas ou todo o processo); e da fábrica (considera a interação entre diferentes processos, incluindo a infraestrutura, iluminação e sistemas de apoio) (PENG e XU, 2014).

Ainda, os estudos podem ocorrer com o objetivo de melhoria direta da eficiência energética, como pela definição dos parâmetros de produção que geram melhor desempenho energético (DENG *et al.*, 2017; MOUZON *et al.*, 2007; SHROUF *et al.*, 2014), ou com o objetivo de analisar sistemas de produção para futuras intervenções de melhoria no processo, como pela análise das características do consumo de energia de um processo (MORADNAZHAD e UNVER, 2017) e balanço energético de um processo (WANG *et al.*, 2017).

Como forma de obter o balanço energético em processos produtivos, é necessário identificar, por meio de observação direta, as etapas do processo que consomem energia e o tipo de energia consumida, convertendo as

diferentes formas de energia para a mesma unidade de medida equivalente (BARAN *et al.*, 2016).

O balanço energético nas indústrias é, na maioria dos casos, conduzido a partir da quantidade de energia (térmica e elétrica) utilizada em cada etapa do processo. Para a mensuração da energia térmica utilizada, deve-se considerar a quantidade de combustível consumido (CIACCO *et al.*, 2017), enquanto a energia elétrica é determinada pela corrente elétrica e a tensão aplicada no equipamento (KARA *et al.*, 2011).

### **2.3.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**

Os conceitos de ACV foram aplicados pela primeira vez em 1969 com o objetivo de quantificar a energia, materiais e consequências ambientais de todo o ciclo de vida das latas de bebida produzidas pela empresa Coca Cola em comparação com o ciclo de vida de garrafas de plástico, algo revolucionário na época (SHELDON, 2016).

A técnica de ACV destaca-se como uma forma para analisar sistemas, seja um produto, serviço ou processo, sob uma perspectiva de todo o ciclo de vida, desde o berço, ao túmulo, quantificando os potenciais impactos ambientais associados a esse sistema (GUINÉE *et al.*, 2011).

Embora os estudos de ACV possuam na maioria dos casos foco voltado para o nível da empresa, existem estudos que abordam a interação entre diversos sistemas, como conjunto de empresas que estão relacionadas de alguma forma (DADDI *et al.*, 2017).

Apesar dos estudos por meio de ACV existirem há cerca de 50 anos, o maior crescimento da sua aplicação ocorreu na segunda década do século XXI, segundo Guinée *et al.* (2011).

Atualmente, a Avaliação do Ciclo de Vida é a técnica mais utilizada para análise de impactos ambientais na implementação de práticas voltadas para o Desenvolvimento Sustentável, seja para avaliação da viabilidade de um

sistema ou para comparação ambiental entre diferentes produtos (LOISEAU *et al.*, 2016).

Além do ganho de popularidade pela capacidade de análises amplas e sistemáticas por meio da ACV, a criação da norma ISO 14040 em 1997 elevou a credibilidade com a padronização para condução dos estudos. A condução da ACV segue as orientações de quatro fases, conforme detalhadas e ilustrada pela Figura 12 (ABNT, 2001).

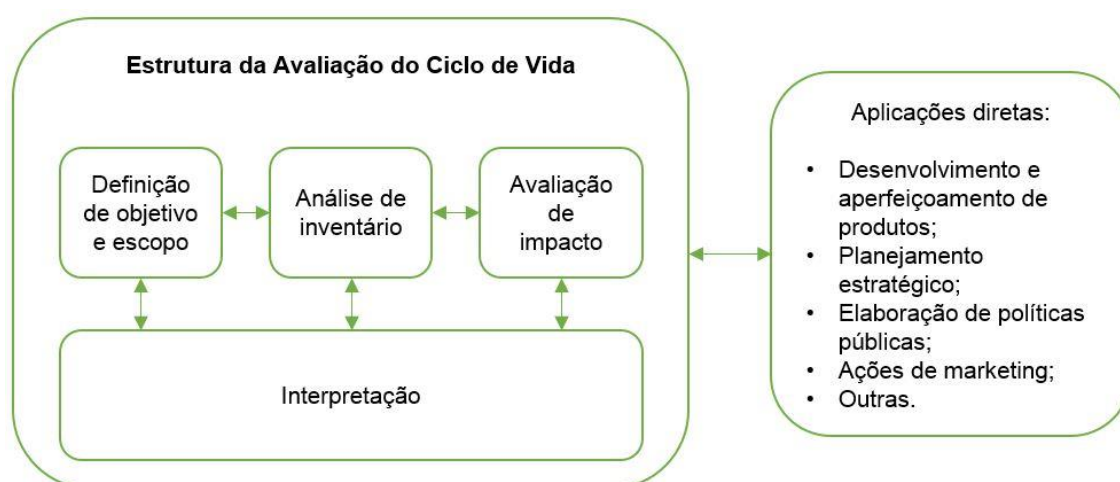


Figura 12 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida  
Fonte: ABNT (2001)

- Definição de objetivo e escopo: ocorre a reflexão sobre a abrangência, profundidade e detalhamento da ACV para que os objetivos do estudo sejam atingidos. Fase de alinhamento entre as razões que levam a realização do estudo e a forma em que o estudo será conduzido, definindo o fluxo do sistema do produto, fronteiras do sistema, limitações, formato de relatório, indicadores analisados, etc.;
- Análise de inventário: envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas do sistema do produto; trata-se de um processo iterativo, portanto, à medida que os estudos avançam surgem novos requisitos ou limitações, podendo ocorrer

reformulações nos procedimentos de coleta de dados ou até mesmo revisões do objetivo ou escopo;

- Avaliação de impacto: fase em que acontece o estudo da significância dos potenciais impactos ambientais por meio dos resultados da análise de inventário; esse estudo associa os dados do inventário com as categorias de impacto definidas anteriormente;
- Interpretação: os resultados das outras três fases são associados e interpretados de forma que seja possível elaborar uma conclusão, explicar as limitações e apresentar recomendações relativas a otimização do sistema.

Seguindo a estrutura proposta pela norma e considerando que a ACV seja aplicável em uma variedade de sistemas e em diversos segmentos, a definição do objetivo e escopo influencia nas questões de profundidade e amplitude de cada projeto de ACV (DELGADO-AGUILAR *et al.*, 2015).

No mesmo sentido, para que o objetivo e escopo do projeto sejam alcançados, a ACV pode ser executada seguindo diferentes abordagens, como a ACV-C – Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Costs Assessment*), ACV-CO<sub>2</sub> – Avaliação das Emissões de Carbono do Ciclo de Vida (*Life Cycle Carbon Emissions Assessment*) e ACV-E – Avaliação Energética do Ciclo de Vida (*Life Cycle Energy Assessment*), cada uma com diferentes categorias quanto aos resultados e limitações (CHAU *et al.*, 2015; SESANA e SALVALAI, 2013).

#### **2.3.3.1. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA (ACV-E)**

Existem na literatura diversos estudos que utilizam a ACV-E, principalmente voltados para o setor de construção civil (CABEZA *et al.*, 2014). Porém, essa é uma abordagem eficaz apenas para os projetos em que o consumo de energia é o objetivo central, pois não considera o balanço de massa do sistema (CHAU *et al.*, 2015; FILIMONAU *et al.*, 2011).

Com aplicação no setor de construção civil, Fay *et al.* (2000) afirmaram que a ACV-E deve ser utilizada para tomada de decisões na etapa de desenvolvimento do projeto, visando a maior eficiência energética, tanto na fase de construção, quanto de uso. De forma complementar, Ramesh *et al.* (2010) apresentaram três fases para análise do consumo de energia no ciclo de vida de uma construção: fase de manufatura, fase de uso e fase de demolição.

Ainda no setor de construção, o artigo “*A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”* (PAULSEN e SPOSTO, 2013) utiliza a ACV-E como forma de analisar os aspectos relacionados ao consumo de energia em casas de um programa social de moradia no Brasil. Os resultados apontam que as casas do programa apresentam potencial para melhoria na energia incorporada, principalmente relacionada com o material utilizado nas paredes.

Apesar da utilização da ACV-E na construção civil, a forma de análise dos casos e os princípios metodológicos da ferramenta não são limitantes para outros tipos de aplicações.

No artigo “*Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites*” (SONG *et al.*, 2009), os autores realizam uma análise do consumo energético no ciclo de vida de compósitos reforçados com fibras, incluindo produção, uso e fim de vida. Os valores obtidos foram comparados com o consumo de energia de outros produtos, como alumínio e aço, em um cenário de aplicação na indústria automotiva.

Com aplicação em uma usina de biogás na Sérvia, Cvetković *et al.* (2016) utilizaram a ACV-E para entender o fluxo de energia em dois cenários diferentes de produção. Também com intenção comparativa, o artigo “*Application of life cycle energy analysis for designing a water distribution network*” (LEE *et al.*, 2018) analisa os aspectos energéticos, por meio da ACV-E, de três possibilidades de rede de distribuição de água na Coreia do Sul.



O artigo “*Life cycle energy assessment of a typical marble processing plant*” (PRAJWAL *et al.*, 2019) analisa o consumo de energia em uma empresa de processamento de mármore na Índia. Tal empresa representa a realidade da maioria das empresas do país, sendo de pequeno porte, baixa eficiência e produtividade. O mármore, por sua vez, é um importante produto na economia da Índia. Os resultados do artigo contribuem para o apontamento de sugestões para redução do consumo de energia.

Em uma análise para entendimento do consumo de energia nos estágios do ciclo de vida de um grupo gerador movido a diesel, apesar de diversas limitações referentes ao nível de completeza dos dados, Benton *et al.* (2017) identificaram que mais de 95% da energia consumida ocorre na fase de uso. Ainda, diferentes cenários para o fim de vida de grupos geradores foram analisados, sendo que a reciclagem e remanufatura se mostraram significantes na redução do consumo de energia em todo ciclo de vida.

#### **2.3.4. TURBOCOMPRESSOR**

Com a diminuição na oferta de petróleo e aumento no custo, a busca por maior economia de combustível é constante entre engenheiros e fabricantes de motores (KATSANOS *et al.*, 2013). No mesmo sentido, os fabricantes enfrentam continuamente os desafios para cumprir regulações de emissões cada vez mais rigorosas, preocupando-se ainda em atender as exigências do mercado (SUN *et al.*, 2014).

Considerando a necessidade de redução do consumo, o foco dos desenvolvimentos é principalmente voltado para a redução do tamanho e aumento da potência dos motores. O uso de turbocompressores em motores automotivos é considerado um dos meios com melhor custo-benefício para melhorar a economia de combustível (FILIPCZYK, 2013).

Os turbocompressores são utilizados como uma forma de recuperar parte da energia desperdiçada pelos motores de combustão interna, reaproveitando o

potencial térmico ou de pressão dos gases lançados para a atmosfera (SEMLITSCH *et al.*, 2014).

A Figura 13 mostra um turbocompressor em corte transversal, indicando seus principais componentes. O funcionamento do turbocompressor é acionado pela absorção dos gases da combustão pela carcaça da turbina (1) que provoca a rotação do rotor da turbina (2). Por meio de um eixo (3) que liga o rotor da turbina ao rotor do compressor (4), o ar da atmosfera é comprimido na carcaça do compressor (5) e direcionado para a câmara de combustão (MOREIRA, 2016).

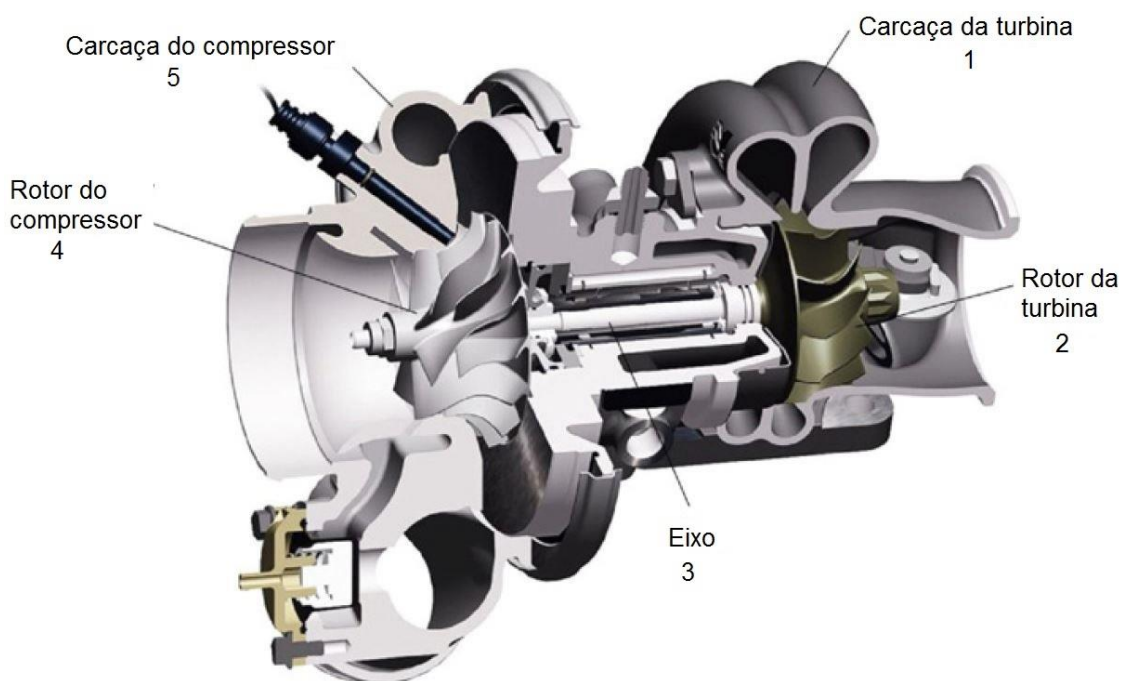


Figura 13 – Turbocompressor em corte transversal – principais componentes  
Fonte: adaptado de Moreira (2016)

Estudos para melhor desempenho dos turbocompressores são desenvolvidos acompanhando as necessidades. Entendendo as variações no desempenho para diferentes cargas aplicadas no motor, Yang *et al.* (2010) desenvolveram uma análise dessas variações e obtiveram resultados satisfatórios em situações de baixa velocidade e alto torque.

Ainda, Wohr *et al.* (2015) contribuíram para o desenvolvimento do projeto de turbocompressores por meio de uma análise geométrica das carcaças, enquanto Katsanos *et al.* (2013) e Ekberg e Eriksson (2017) analisaram a viabilidade da implementação de sistemas para geração de energia elétrica nos turbocompressores.

Os Turbocompressores são dispositivos que, devido às condições de alta rotação e temperatura, exigem precisão dimensional e utilização de ligas especiais na produção dos componentes. Nesse sentido, Filipczyk (2013) e Moreira (2016) desenvolveram análises sobre as falhas em turbocompressores.

Considerando a complexidade geométrica e precisão dimensional dos componentes, diferentes processos de manufatura são empregados até a montagem dos turbocompressores, como fundição e usinagem (MOREIRA, 2016; SUNG e KIM, 2007).

Quanto aos materiais, é importante a utilização de diferentes ligas para cada componente, de forma a garantir a funcionalidade e durabilidade, sendo que uma quantidade considerável das falhas em turbocompressores está relacionada ao uso de materiais inadequados (FILIPCZYK, 2013). Estudos foram desenvolvidos para redução das falhas associadas ao material utilizado, tendo como exemplo a análise da influência da utilização do titânio nos rotores do compressor, realizada por Smolik *et al.* (2015).

#### **2.4. SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA**

Em busca de sistemas produtivos menos impactantes ao meio ambiente, o consumo de energia representa papel central nesse desafio enfrentado pelas indústrias. A redução do consumo de energia pode proporcionar significativa redução dos impactos ambientais do setor industrial, porém é necessário observar a relevância da energia na manutenção da competitividade das organizações.

São encontrados estudos de diversas naturezas na literatura que relacionam o consumo de energia com o setor industrial, voltados principalmente para o monitoramento e otimização energética em processos de usinagem. Entretanto, existe uma escassez de estudos que proporcionem uma visão sistêmica dos diversos sistemas produtivos, bem como o inventário de consumo de energia ao longo das etapas.

Para o propósito de levantamento e análise de inventário de sistemas produtivos, a ACV é uma importante ferramenta, mostrando-se versátil e eficaz. Em sistemas produtivos energeticamente intensivos, em que o consumo de energia é elevado pelas características do processo, a abordagem de ACV-E representa uma forma assertiva de análise de todo sistema em busca de maior eficiência energética.

A utilização da técnica de ACV-E, apesar de se mostrar viável para quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, ainda é pouco explorada no contexto industrial, sendo a maior ocorrência de sua aplicação no setor de construção. Mesmo considerando os estudos de ACV-E na construção, existe uma lacuna de estudos que prescrevem a aplicação dessa técnica.

Existem limitações na literatura de quantificação do consumo de energia no contexto industrial, especialmente com a abordagem de ciclo de vida do produto. Assim, é pertinente a existência de novos estudos que explorem a lacuna identificada.

Por fim, os turbocompressores, dispositivos utilizados para a aplicação do guia, são aplicados em motores de combustão interna, principalmente em veículos pesados, e possuem, ao longo de seu sistema produtivo, diversos processos intensivos no consumo de energia. A literatura sobre turbocompressores é limitada, sendo que os artigos encontrados abordam questões relacionadas ao produto e não ao processo.

### 3. MÉTODO DA PESQUISA

Para que uma pesquisa seja considerada científica ou acadêmica, é necessário que haja um método bem definido, constituído de um conjunto de atividades sistemáticas e racionais para atingir um objetivo (MARCONI e LAKATOS, 2003), uma solução (MIGUEL *et al.*, 2012) ou o conhecimento (PRODANOV e FREITAS, 2013).

No que diz respeito à natureza, a presente pesquisa é classificada como aplicada, pois busca produzir conhecimentos que possibilitem a solução de problemas específicos (PRODANOV e FREITAS, 2013). Quanto aos objetivos, é classificada como exploratória, de modo a entender o funcionamento do objeto de estudo, e descritiva, uma vez que as relações entre as variáveis são coletadas e descritas de forma sistemática (TURRIONI e MELLO, 2012).

Em relação à abordagem do problema, esta pesquisa utiliza aspectos tanto da abordagem quantitativa, quanto qualitativa, constituindo, portanto de uma abordagem mista (CRESWELL, 2010).

Expostas as classificações metodológicas pertinentes da pesquisa, as fases para o desenvolvimento da pesquisa seguem a abordagem metodológica do *Design Research Methodology* – DRM (BLESSING e CHAKRABARTI, 2009), simplificadas conforme a Figura 14.

O DRM consiste de quatro estágios, sendo cada um deles conduzido para a obtenção de um resultado principal. Os estágios e as saídas principais são detalhados a seguir:

- Estágio 1 – Clarificação da pesquisa: neste estágio é conduzido uma busca, principalmente por meio de análise da literatura, por evidências ou indicações que apoiem a formulação dos objetivos da pesquisa;
- Estágio 2 – Estudo descritivo I: neste estágio, de posse de uma clara definição do foco e objetivo da pesquisa, uma revisão de dados

empíricos é conduzida no sentido de permitir a ampliação do conhecimento acerca dos temas da pesquisa;

- Estágio 3 – Estudo prescritivo: a partir do conhecimento obtido no estágio anterior, este estágio é destinado para a elaboração de uma descrição da situação, permitindo a representação da situação desejada no primeiro estágio;
- Estágio 4 – Estudo descritivo II: neste estágio ocorre a investigação da descrição realizada no estágio anterior em relação a capacidade de satisfazer os objetivos definidos no primeiro estágio.



Figura 14 – Estágios do desenvolvimento metodológico da pesquisa  
Fonte: adaptado de Blessing e Chakrabarti (2009)

Assim, as atividades da presente dissertação foram desenvolvidas de acordo com cada um dos estágios estabelecidos pelo DRM (BLESSING e CHAKRABARTI, 2009), como descritos a seguir.

### **3.1. Clarificação da pesquisa**

As atividades envolvidas neste estágio consistem da avlição da literatura existente, identificando a justificativa e relevância do tema da pesquisa. A partir disso, o problema de pesquisa foi levantado de acordo com a lacuna encontrada e, conseqüentemente, os objetivos foram definidos. As informações obtidas a partir desse estágio foram disponibilizados na introdução desta dissertação.

### **3.2. Estudo descritivo I**

Neste estágio, uma revisão ampla e profunda da literatura foi conduzida no sentido de ampliar os conhecimentos acerca dos tópicos relacionados com os objetivos da pesquisa. As atividades envolvidas neste estágio proporcionam uma base para o desenvolvimento do estágio seguinte.

A literatura acerca de desenvolvimento sustentável, consumo de energia em sistemas de manufatura e avaliação do ciclo de vida foi explorada no segundo capítulo desta dissertação – Revisão da literatura.

### **3.3. Estudo prescritivo**

Com base nas informações levantadas e conhecimentos adquiridos no segundo estágio, este estágio descreve a solução encontrada para os objetivos estabelecidos. A apresentação do estudo prescritivo acontece na primeira parte dos resultados desta dissertação, por meio da proposição de um guia para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura.

Para o desenvolvimento do guia, foi utilizado como base a norma ISO 14040 (ABNT, 2001) e a literatura com temas relacionados à ACV-E. A partir disso, as etapas e passos foram definidas em um processo iterativo, conduzido simultaneamente com a aplicação do guia em uma empresa produtora de turbocompressores.

### 3.4. Estudo descritivo II

Em conjunto com a proposição do guia, este estágio consiste da aplicação dos passos estabelecidos em um sistema de manufatura real, apresentando na segunda parte dos resultados desta dissertação.

A empresa utilizada para coleta de dados está situada no interior de São Paulo e atende ao mercado de reposição para veículos pesados. As unidades fabris dessa empresa controlam a produção da maior parte dos componentes dos turbocompressores, passando por fundição, usinagem e montagem. Assim, tendo em vista suas características e as condições de acesso, a empresa é adequada para os objetivos deste estudo.

Durante a condução da coleta de dados, foi necessário o apoio de diferentes departamentos, de acordo com as suas funções, como:

- Engenharia do produto: responsável pelo desenvolvimento de novos produtos e componentes, especificações técnicas e gerenciamento do portfólio;
- Departamento de compras: responsável pela seleção e negociação de fornecedores e prestadores de serviços externos;
- Departamento de manutenção: responsável pelo funcionamento de equipamentos mecânicos e elétricos, bem como a estrutura predial;
- Departamento de produção: responsável pela execução das atividades ligadas diretamente à produção, como atendimento da demanda e gestão do processo.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. O GUIA PROPOSTO

Nesta seção é apresentado o guia proposto para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, constituído por quatro etapas e subdividido em dez passos, conforme ilustrado pela Figura 15. Cada uma das etapas e passos serão explicados a seguir (subcapítulos 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4) e explorados pela apresentação da sua aplicação em um caso real (subcapítulos 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4). Apesar do guia ser apresentado de forma linear, a condução dos passos pode ocorrer de forma iterativa.

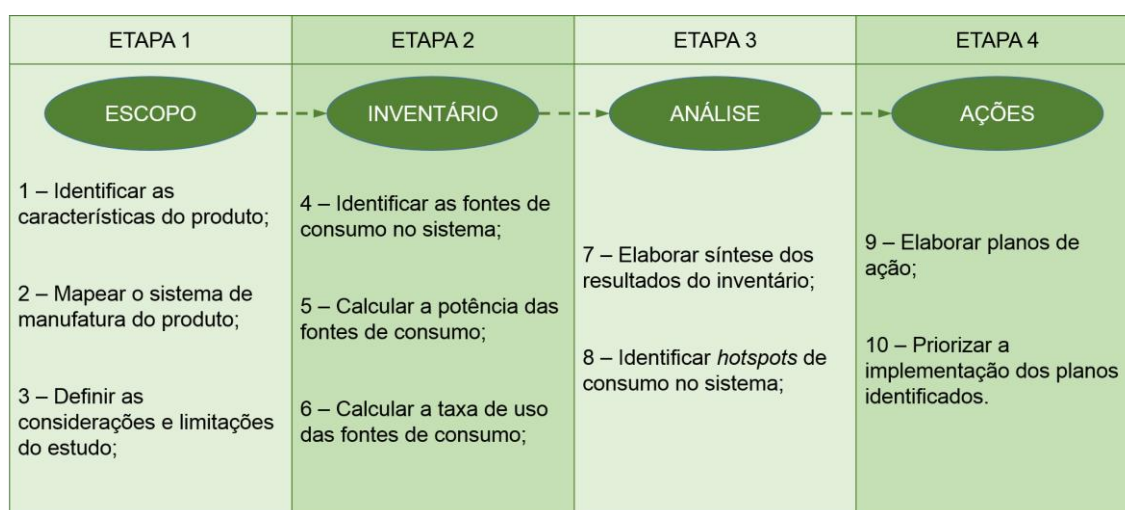


Figura 15 – Guia para quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura

#### 4.1.1. ETAPA 1 – ESCOPO

Esta etapa tem como objetivo principal a definição do objetivo e escopo do estudo, em que são realizadas as considerações acerca do produto, do sistema de manufatura e as fronteiras da análise.

- Passo 1 – Identificar as características do produto

Neste passo deve ser definido o produto a ser analisado, possibilitando a descrição de suas características. Os principais aspectos considerados

devem ser em relação à função do produto, unidade funcional, fluxo de referência e estrutura do produto (componentes utilizados na sua composição final).

A definição da função principal do produto é importante, pois além de ilustrar com clareza o que é abordado no estudo, possibilita estabelecer a unidade funcional e o fluxo de referência do estudo, proporcionando a oportunidade de futuros estudos comparativos. Em relação à estrutura do produto, a identificação dos componentes utilizados é fundamental para as próximas etapas (Inventário e Análise).

- Passo 2 – Mapear o sistema de manufatura do produto

O segundo passo tem como objetivo o entendimento do sistema de manufatura, contemplando o sequenciamento dos processos e operações, bem como suas características. O sistema de manufatura do produto deve ser mapeado dentro dos limites do estudo, definindo cada uma das etapas.

- Passo 3 – Definir as considerações e limitações do estudo

No terceiro passo, é onde deve ocorrer o estabelecimento das considerações acerca do estudo, definindo as premissas para a condução das demais etapas, bem como as limitações encontradas.

#### **4.1.2. ETAPA 2 – INVENTÁRIO**

Esta etapa tem como objetivo principal o levantamento dos dados referentes ao consumo de energia do sistema de manufatura, incluindo a organização e associação entre as variáveis.

Os dados coletados nos passos a seguir devem ser organizados de forma hierarquizada em uma planilha. A Figura 16 ilustra a forma resumida para a associação dos dados na planilha, de forma a proporcionar uma análise concreta e sistêmica.

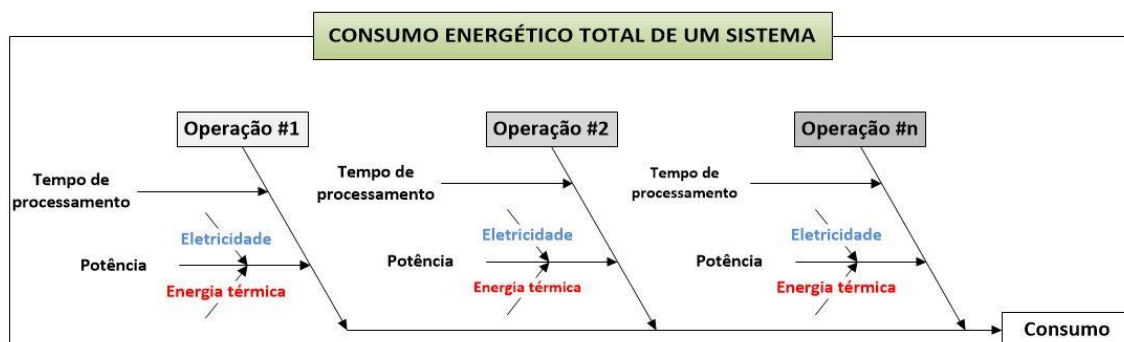


Figura 16 – Relação entre as variáveis para coleta dos dados

A associação das diversas operações, juntamente com seus respectivos consumos, forma os processos utilizados para cada um dos componentes até a obtenção do produto final. A Figura 17 apresenta um exemplo de como os dados podem ser organizados em uma planilha eletrônica (*Excel – Microsoft*). Nesse caso, a coluna C apresenta a potência (consumo por hora) de cada uma das operações (coluna B) que formam os processos (coluna A).

Em seguida, o consumo de energia para cada um dos componentes do produto final é analisado em função do tempo de processamento em cada operação e a respectiva potência. Como exemplo, o consumo de energia na produção do “Componente X” (coluna E) é obtido pela multiplicação do tempo de processamento (coluna D) com a potência da operação (coluna C).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Processo	Operação	Potência (KW/h)	Produção dos componentes						Montagem		Consumo por operação	Consumo por processo
2				Componente X		Componente Y		Componente Z		Tempo (hora)	Consumo (KW/h)		
3				Tempo (hora)	Consumo (KW/h)	Tempo (hora)	Consumo (KW/h)	Tempo (hora)	Consumo (KW/h)	Tempo (hora)	Consumo (KW/h)		
4	Processo A	A1											
5		A2											
6		A3											
7		A4											
8	Processo B	B1											
9		B2											
10		B3											
11		B4											
12		Consumo total											

Figura 17 – Organização dos dados de inventário em uma planilha Excel

Ainda, a linha 12 apresenta o consumo total de energia para cada um dos componentes do produto final, assim como a coluna M apresenta o consumo

total de energia por processo. Assim, a partir do entendimento para organização dos dados, os passos a seguir descrevem como a coleta dos dados deve ser conduzida.

- Passo 4 – Identificar as fontes de consumo no sistema

A partir da definição de todos os processos do sistema de manufatura, este passo tem como objetivo identificar as operações necessárias para cada um dos processos, bem como o tipo de energia consumido em cada um – energia térmica ou energia elétrica. Ainda, para os casos de consumo de energia térmica, deve ser identificado o tipo de combustível utilizado.

- Passo 5 – Calcular a potência das fontes de consumo

Uma vez identificada cada uma das operações que consomem energia no sistema de manufatura, o passo 5 tem como objetivo calcular a potência de consumo em cada operação.

Para as operações que consomem energia elétrica, a potência é definida pela multiplicação da tensão com a corrente elétrica nos equipamentos em operação. É importante ressaltar que os valores podem sofrer alterações de acordo com o padrão de uso do equipamento, sendo necessário fazer medições que permitam a obtenção de uma média da taxa de utilização.

Para as operações que consomem energia térmica, a potência é definida pelo tipo de combustível utilizado e pelo consumo médio ao longo de um período. O tipo de combustível utilizado influencia na potência de acordo com seu poder calorífico, juntamente com a quantidade, que é quantificado, por meio de medidores de fluxo (rotâmetros).

- Passo 6 – Calcular a taxa de uso das fontes de consumo

Posteriormente, no sexto passo, deve ser conduzida a medição do tempo de utilização em cada uma das operações. A cronometragem deve ser conduzida de forma que as variações ao longo dos processos sejam minimizadas, obtendo um valor coerente com as considerações do sistema de manufatura.

#### 4.1.3. ETAPA 3 – ANÁLISE

Esta etapa tem como objetivo a apresentação de uma compilação dos resultados obtidos, proporcionando uma análise clara e ampla dos principais destaques encontrados ao longo do ciclo de vida.

- Passo 7 – Elaborar síntese dos resultados do inventário

Este passo tem como objetivo disponibilizar as informações obtidas no inventário por meio de gráficos e tabelas, de forma que possibilitem análises sistêmicas do consumo de energia.

- Passo 8 – Identificar *hotspots* de consumo no sistema

No oitavo passo, o objetivo é analisar e discutir os elementos disponibilizados no passo anterior, identificando os *hotspots* e os fatores associados com o consumo de energia.

#### 4.1.4. ETAPA 4 – AÇÕES

Esta etapa tem como objetivo o desenvolvimento de um plano de ações em direção a maior eficiência energética e desenvolvimento sustentável, sendo que a forma de implementação das ações deve sofrer variações, de acordo com as características de cada empresa.

- Passo 9 – Elaborar planos de ação

Neste passo, o objetivo principal é o levantamento de possíveis ações para maior eficiência energética no sistema.

- Passo 10 – Priorizar a implementação dos planos identificados

Finalmente, o último passo tem como objetivo viabilizar e priorizar a implementação de ações para maior eficiência energética, baseando-se em critérios da empresa, como capacidade técnica e financeira.

## **4.2. APLICAÇÃO DO GUIA NO SISTEMA DE MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES**

Esta etapa tem por finalidade demonstrar a quantificação do consumo de energia no sistema de manufatura de turbocompressores e, a partir disso, elucidar as etapas e passos propostos no guia.

### **4.2.1. ESCOPO DO SISTEMA DE MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES**

- Características do produto

O turbocompressor tem como função primária a potencialização de motores de combustão interna para diversas aplicações, como automotivo, marítimo e industrial. Além disso, como decorrência da maior potência do motor, o turbocompressor pode proporcionar economia de combustível e redução na quantidade de materiais particulados lançados na atmosfera.

Todo o sistema produtivo analisado neste estudo é direcionado para a produção dos turbocompressores; entretanto, os processos analisados possuem ampla aplicabilidade e podem ser utilizados em sistemas produtivos de outros produtos.

A unidade funcional do turbocompressor é medida em relação à potência adicional que o dispositivo proporciona em motores de combustão interna, sendo considerado neste estudo a quantidade de 76 cavalos-vapor (cv).

Para atender a unidade funcional considerada, será utilizado um turbocompressor com aplicação prevista para motores movidos a diesel da família OM-366 da Mercedes-Benz.

Para a montagem do turbocompressor, são utilizados 73 componentes, sendo 15 deles produzidos internamente em processos de fundição (correspondente a mais de 88% do peso total). Alguns componentes que não são produzidos internamente, na maioria elementos de fixação e outros componentes padronizados, são transformados por operações de usinagem e os demais são utilizados diretamente na montagem.

A Figura 18 apresenta o turbocompressor e a identificação dos componentes que serão analisados, considerando todos aqueles que passam por algum tipo de transformação interna.

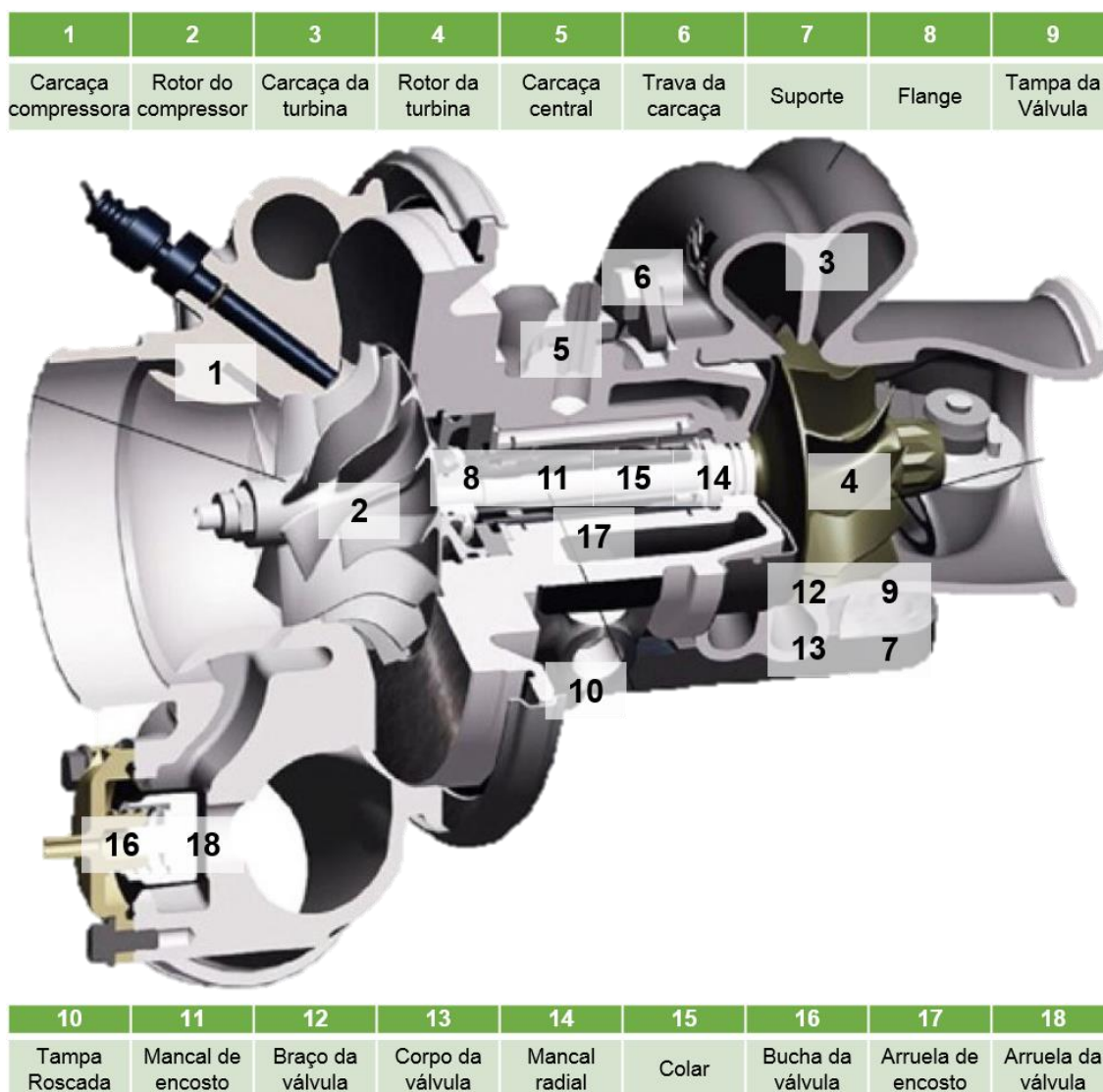


Figura 18 – Os componentes analisados no turbocompressor

De forma complementar, o Quadro 5 apresenta o material, peso e quais os setores internos que os componentes são processados.

Quadro 5 – Componentes do turbocompressor analisado

<b>Componente</b>	<b>Material</b>	<b>Peso (Kg)</b>	<b>Setor</b>
Carcaça compressora	Alumínio	1,280	Coquilha; usinagem
Rotor do compressor	Alumínio	0,096	Fundição em gesso; usinagem
Carcaça da turbina	Aço carbono	5,218	Fundição em areia; usinagem
Rotor da turbina	Superliga	0,374	Microfusão; usinagem
Carcaça central	Aço carbono	2,234	Fundição em areia; usinagem
Trava da carcaça	Aço carbono	0,031	Microfusão
Suporte	Aço inox	0,151	Microfusão
Flange	Aço carbono	0,107	Microfusão; usinagem
Tampa da válvula	Aço carbono	0,018	Microfusão; usinagem
Tampa roscada	Aço carbono	0,046	Microfusão; usinagem
Mancal de encosto	Bronze	0,044	Microfusão; usinagem
Braço da válvula	Aço inox	0,009	Microfusão; usinagem
Corpo da válvula	Aço inox	0,023	Microfusão; usinagem
Mancal radial	Bronze	0,009	Usinagem
Colar	Aço inox	0,022	Usinagem
Bucha da válvula	Bronze	0,013	Usinagem
Arruela de encosto	Aço inox	0,004	Usinagem
Arruela da válvula	Aço inox	0,001	Usinagem

- Mapeamento do sistema de manufatura:

Em uma macrovisão, representado pela Figura 19, o sistema de manufatura do turbocompressor pode ser dividido entre os processos que estão diretamente associados com o produto, denominado consumo direto (fundições, usinagem e montagem).

Ainda, observam-se os processos que, apesar de não estarem diretamente associados à transformação, são importantes para o produto e representam



consumo de energia, denominado consumo indireto (qualidade, logística interna, administrativo, compressor de ar, iluminação e geração de energia).

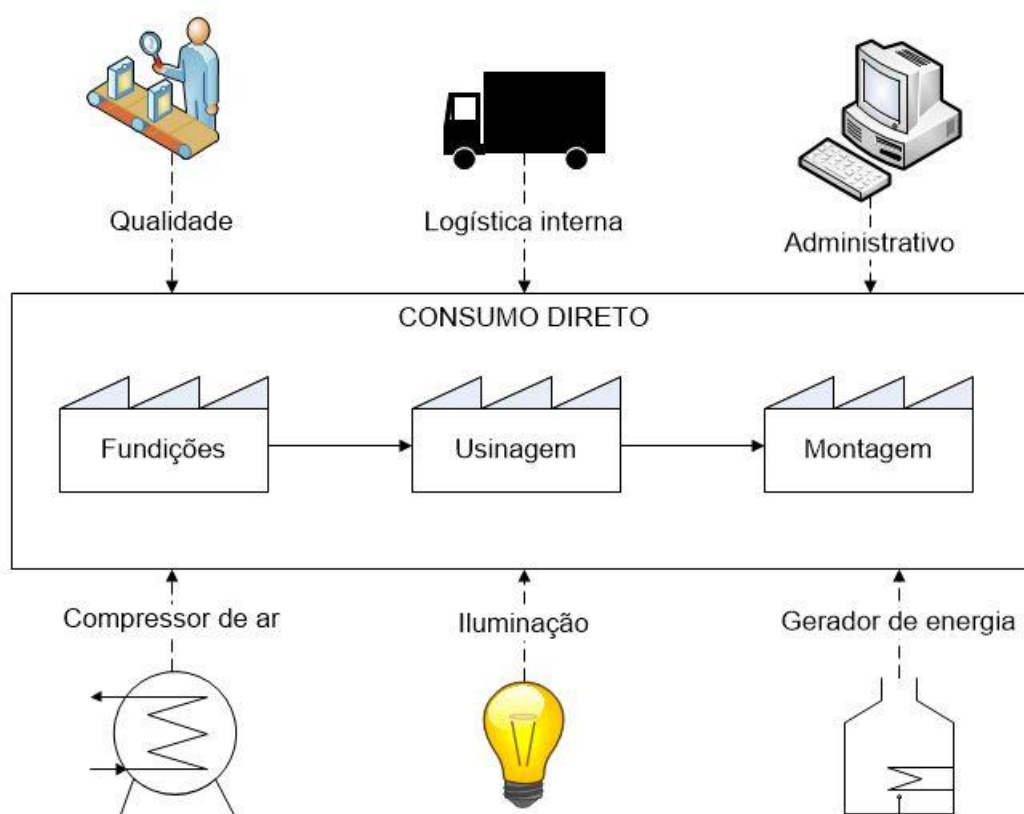


Figura 19 – Fontes de consumo ao longo do sistema produtivo

Os processos de consumo indireto no sistema de manufatura, considerados neste estudo, são descritos a seguir:

**Qualidade:** a qualidade consiste das operações de análise dos componentes, tanto de composição quanto dimensional, antes do processo de montagem;

**Logística interna:** para a logística interna são consideradas as operações de armazenamento e movimentação dos insumos, materiais em processamento e produtos acabados;

**Administrativo:** o administrativo abrange todas as atividades e setores de gestão, como setores de engenharia, comercial e gestão da produção;

**Compressor de ar:** os compressores de ar são utilizados em diversos setores ao longo do sistema de manufatura;

**Iluminação:** a iluminação é constituída por lâmpadas de diversos tipos e luminosidade, distribuído ao longo de todos os setores da empresa;

**Gerador de energia:** um grupo gerador de energia alimentado por óleo diesel é utilizado diariamente no horário de pico, como uma alternativa economicamente viável diante do aumento da tarifa de energia elétrica, atendendo a demanda de operações como manutenção e limpeza.

Passando para os processos que envolvem o consumo de energia diretamente associado ao sistema de manufatura do produto, os componentes, de acordo com as suas características dimensionais e materiais, são produzidos por meio de quatro processos diferentes de fundição: microfusão, fundição em areia, fundição em gesso e coquilha. Posteriormente, no setor de usinagem, os componentes fundidos são processados e encaminhados para a montagem.

A Figura 20 apresenta um fluxograma simplificado dos processos envolvidos na produção do turbocompressor, bem como os componentes transformados em cada processo.

Os setores de fundição possuem estrutura para a fabricação de peças em diversos materiais, como aço carbono, aço inoxidável, bronze e alumínio. Assim, pela flexibilidade de produção e capacidade instalada, os setores de fundição atendem não somente a demanda dos turbocompressores, mas também clientes externos. Por outro lado, o setor de usinagem, equipado com tornos, fresas, fornos, e outros, é dedicado exclusivamente para os turbocompressores.

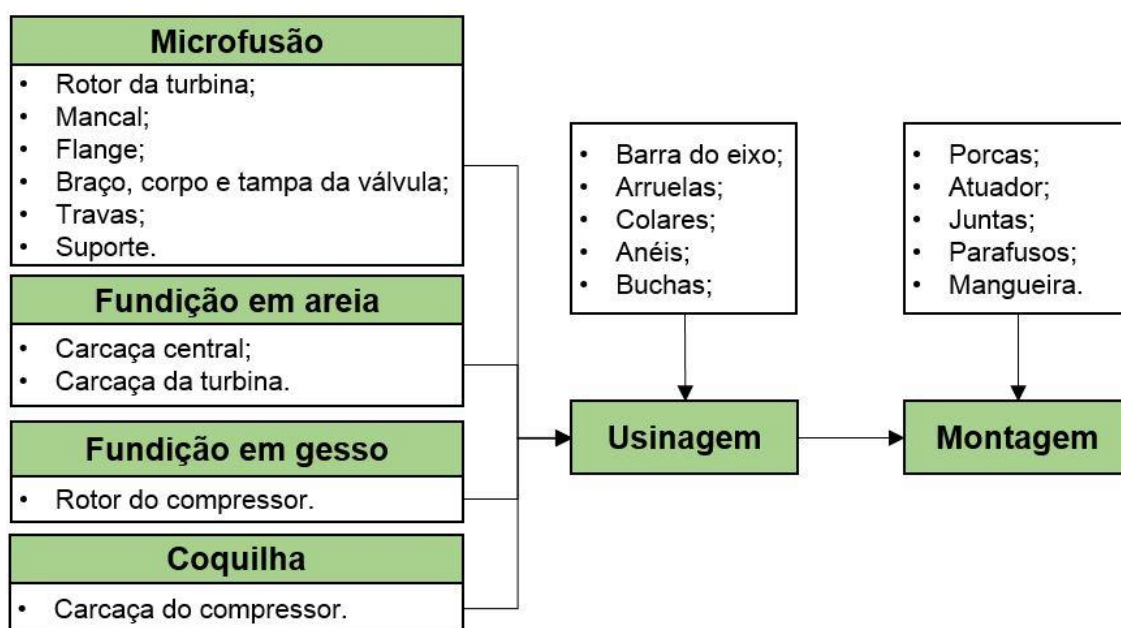


Figura 20 – Processos e componentes da produção de turbocompressores

Na produção dos componentes, cada um dos processos possui características específicas que justificam a sua utilização na produção de determinado componente, seja por questões técnicas ou financeiras. O Quadro 6 apresenta as características dos componentes e de cada processo de fundição encontrado na empresa, sendo detalhados posteriormente.

Quadro 6 – Processos para a produção de turbocompressores

Processo	Características do processo	Características dos componentes
Microfusão	Possibilita geometrias complexas em grande variedade de metais, bom acabamento superficial e precisão dimensional. Processo complexo e lento.	Usado para peças de 0,010 a 0,350 Kg, geometricamente complexas e em liga de metais ferrosos.
Fundição em areia	Aplicável para grande variedade de metais. Apresenta limitações para a geometria das peças;	Usado para peças de 2,000 a 5,500 Kg, com geometria simples em metais ferrosos.
Fundição em gesso	Possibilita geometrias complexas, geralmente utilizadas para ligas de metais não ferrosos, alto nível de precisão dimensional e acabamento superficial.	Usado para peças de 0,200 Kg, geometricamente complexas e em liga de alumínio.
Coquilha	Limitação na geometria da peça, geralmente utilizado para metais não ferrosos, bom acabamento superficial e precisão dimensional.	Usado para peças de 1,500 Kg com geometria simples e em liga de alumínio.

Os processos de fundição são constituídos de três etapas: montagem do molde, vazamento do metal e acabamento. Cada um dos processos e as operações necessárias são ilustrados pela Figura 21 e explicados a seguir, juntamente com os processos de usinagem e montagem.

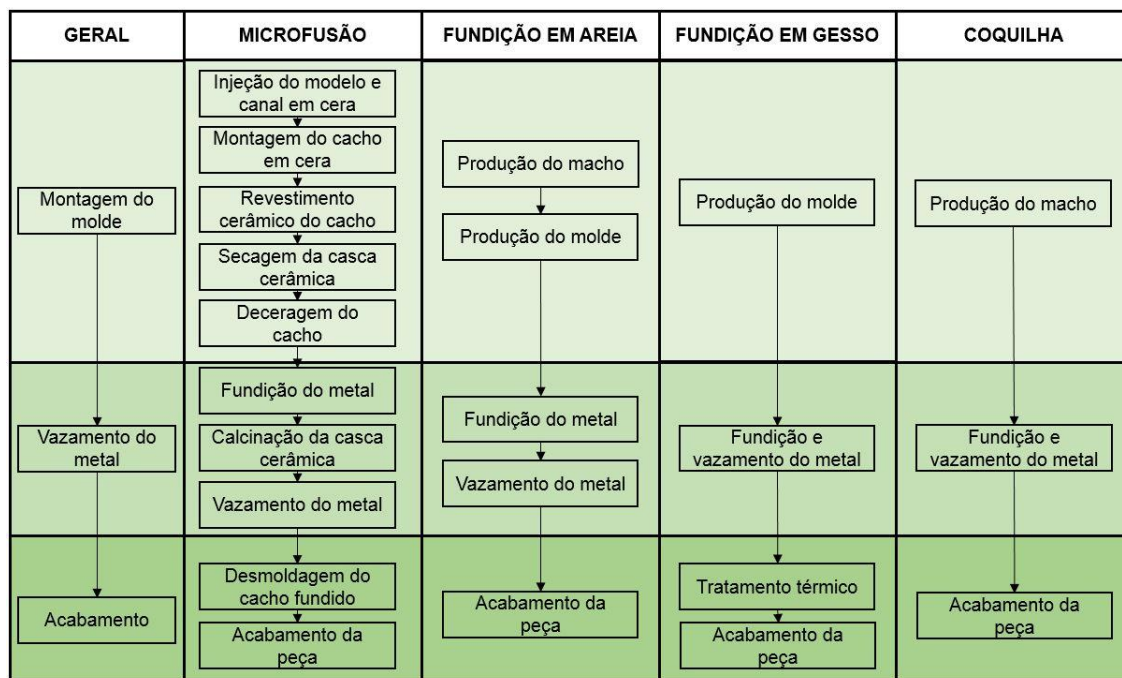


Figura 21 – Etapas de operações para os processos de fundição

**Microfusão:** o processo de microfusão, também conhecido como cera perdida ou fundição de precisão, é o mais complexo. Para a montagem do molde são utilizados modelos em cera, que são colados em um canal de alimentação também em cera, denominado cacho, e posteriormente revestidos com um material cerâmico. O cacho em cera com o revestimento cerâmico é submetido à uma câmara com pressão e temperatura que promovem a remoção de toda a cera, restando apenas a casca cerâmica em que o material metálico será vazado.

A casca cerâmica passa por um processo de calcinação para que o molde obtenha as características para recebimento da liga correspondente ao

componente. Após o vazamento do metal e resfriamento do cacho, as peças são separadas do canal de alimentação e recebem o acabamento necessário.

**Fundição em areia:** no processo de fundição em areia, a geometria é limitada pois o molde é produzido a partir de um modelo permanente e, após a modelagem em areia, é necessário que o modelo seja retirado do interior do molde. Diante disso, o molde é dividido em duas partes, a base e a tampa, e utiliza-se a técnica de macharia em areia para obter formas mais complexas.

O molde em areia não necessita ser aquecido para o recebimento do material fundido. Após o vazamento, resfriamento da peça fundida e desmoldagem, a areia pode ser reutilizada e a peça passa pelas operações de acabamento.

**Fundição em gesso:** o processo de fundição em gesso é similar em alguns aspectos da fundição em areia. O molde é produzido a partir de um modelo permanente, passando por secagem em temperatura e umidade controlada. O vazamento do metal, diferente dos demais processos que são conduzidos de forma manual, ocorre por um sistema de injetor de alumínio.

Após o resfriamento da peça fundida, o modelo em gesso é quebrado e não reutilizado no sistema. As peças passam por um tratamento térmico e posteriormente pelas operações de acabamento.

**Coquilha:** o processo de coquilha, também conhecido por molde metálico ou molde permanente, é o mais simples dentre os apresentados. O molde é formado por duas partes para que a peça seja removida após o resfriamento do metal fundido. Existe a necessidade da utilização da técnica de macharia em areia, que é removida nas operações de acabamento, em que ocorre também a remoção do canal de alimentação e jato de granalha.

**Usinagem:** após a produção das peças nos setores de fundição, o setor de usinagem (também conhecido por manufatura subtrativa) é responsável pelo processamento, tanto das peças produzidas internamente quanto das peças adquiridas de clientes externos, para que os componentes estejam prontos

para a montagem. O setor de usinagem conta com as operações de torneamento, fresamento, retificação e outras.

**Montagem:** a etapa de montagem dos turbocompressores é uma das últimas etapas de todo o sistema de produção, incluindo também a operação de embalagem. A montagem do produto final é conduzida a partir de conjuntos previamente formados pelos componentes, sendo o conjunto central, do rotor, da válvula, da turbina e do compressor.

É utilizada apenas eletricidade como fonte de energia consumida diretamente na montagem dos turbocompressores, decorrente de equipamentos de medição e ajuste, como balanças e parafusadeira.

- Considerações e limitações

A tecnologia de funcionamento dos turbocompressores foi desenvolvida há mais de um século e é conhecida no setor industrial. Diferentes características aerodinâmicas e de componentes são utilizadas por cada fabricante, visando a um melhor desempenho, maior durabilidade e menor custo; porém, esses aspectos não são abordados na atual análise.

Em relação ao sistema produtivo, diversos processos da indústria metalmeccânica são utilizados, todos com conceitos e tecnologias difundidos. Algumas variações nas particularidades operacionais podem ocorrer de uma empresa para outra, principalmente nos processos de microfusão e fundição em gesso; porém, tais limitações não devem influenciar na capacidade de generalização do estudo.

Apesar da comercialização do turbocompressor ocorrer tanto no mercado interno, quanto externo, o escopo geográfico desta análise tem foco no Brasil, tendo em vista que todo o processo produtivo ocorre em território nacional e a logística de distribuição não é considerada.

Para a etapa de Inventário, os dados foram coletados de forma primária, por meio de observação direta e medições *in loco*, e secundária, por meio da literatura e especificações técnicas dos fornecedores de equipamentos e insumos de produção.

Para o cálculo da energia térmica, foram considerados os seguintes dados:

- Poder calorífico do GLP: 11.750 Kcal/Kg;
- Poder calorífico do Gás natural (GN): 8.800 Kcal/Kg;
- Poder calorífico do Óleo diesel: 10.100 Kcal/Kg;
- Fator de conversão de Quilocalorias para Quilowatts:  $11,6222 \times 10^{-4}$

Como limitações do presente estudo, houve a exclusão de alguns componentes na análise, ainda que pouco representativos perante o peso total do turbocompressor, bem como exclusão das etapas relacionadas ao início e fim do ciclo de vida (extração da matéria prima e disposição final, respectivamente).

Ainda, os dados utilizados são provenientes de uma média coletada ao longo de três meses de produção, podendo haver flutuações nos resultados de acordo com a demanda de produção e taxa de utilização da capacidade instalada.

#### **4.2.2. INVENTÁRIO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES**

A Tabela 6 apresenta os dados obtidos por meio dos passos 4, 5 e 6 e sintetizados para o inventário do consumo de energia no ciclo de vida da manufatura dos turbocompressores.

Tabela 6 – Inventário do ciclo de vida da produção de turbocompressores

Operações	Consumo por turbocompressor (KWh)		
	Energia elétrica	Energia térmica	Total
<b>MICROFUSÃO</b>			
Injeção do modelo e canal em cera	0,422	-	0,422
Montagem do cacho em cera	-	0,062	0,062
Revestimento cerâmico do cacho	0,375	-	0,375
Secagem da casca cerâmica	3,111	-	3,111
Deceragem do cacho	0,718	-	0,718
Fundição do metal	3,318	-	3,318
Calcinação da casca cerâmica	0,618	2,898	3,517
Vazamento do metal	-	0,466	0,466
Desmoldagem do cacho fundido	0,224	-	0,224
Acabamento da peça	0,385	-	0,385
<b>FUNDIÇÃO EM AREIA</b>			
Produção do macho	0,268	-	0,268
Produção do molde	0,352	0,156	0,508
Fundição do metal	6,890	-	6,890
Vazamento do metal	-	0,304	0,304
Acabamento da peça	0,736	-	0,736
<b>FUNDIÇÃO EM GESSO</b>			
Produção do molde	0,750	-	0,750
Fundição e vazamento do metal	10,332	-	10,332
Tratamento térmico	1,875	-	1,875
Acabamento da peça	0,021	-	0,021
<b>COQUILHA</b>			
Produção do macho	-	-	-
Fundição e vazamento do metal	15,280	-	15,280
Acabamento da peça	0,300	-	0,300
<b>USINAGEM</b>			
Torneamento	7,489	-	7,489
Fresamento	5,292	-	5,292
Retificação	0,826	-	0,826
Outras operações de usinagem	3,276	-	3,276
<b>MONTAGEM</b>			
Montagem do turbocompressor	0,750	-	0,750
Embalagem	0,021	-	0,021



Operações	Consumo por turbocompressor (KWh)		
	Energia elétrica	Energia térmica	Total
<b>QUALIDADE</b>			
Controle de qualidade	0,193	-	0,193
<b>LOGÍSTICA INTERNA</b>			
Armazenagem	0,147	-	0,147
Empilhadeiras	-	0,615	0,615
<b>ADMINISTRATIVO</b>			
Engenharia, comercial e gestão	0,712	-	0,712
<b>COMPRESSOR DE AR</b>			
Conjunto de compressores	11,569	-	11,569
<b>ILUMINAÇÃO</b>			
Lâmpadas	2,378	-	2,378
<b>GERADOR DE ENERGIA</b>			
Grupo gerador a diesel	-	13,304	13,304
Produção final	78,627	17,805	96,432

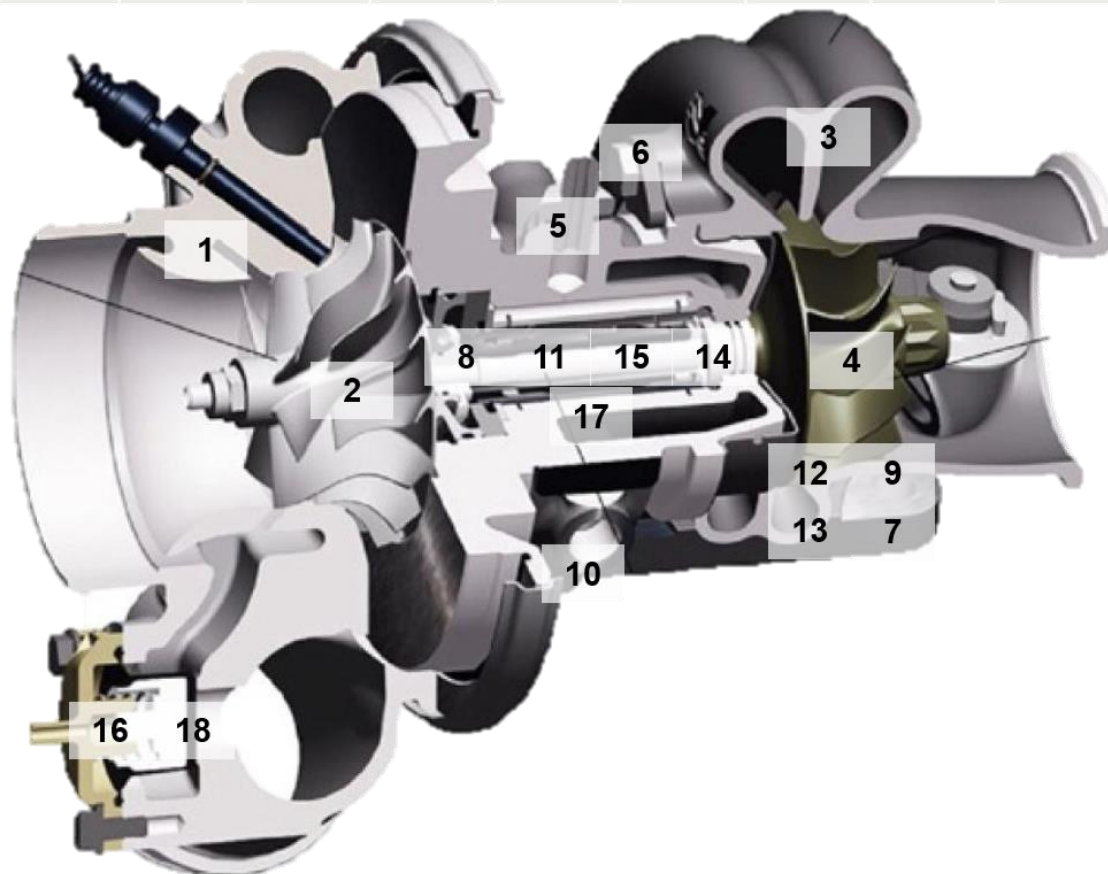
#### **4.2.3. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES**

Os dados apresentados no inventário correspondem à quantidade de energia consumida ao longo de todo o sistema produtivo (96,432 KWh), sendo mais de dois terços (66,745 KWh) representados pelo consumo de energia na produção dos componentes.

A Figura 22 identifica os componentes analisados e seu respectivo consumo direto de energia ao longo das operações no sistema. Alguns componentes, como suporte, tampas e outros componentes da válvula, não podem ser identificados pois a imagem utilizada não se refere a um turbocompressor real.

Dentre os 18 componentes analisados, cinco deles são responsáveis por mais de 85% do consumo de energia nas fundições e usinagem, sendo as três carcaças (da turbina, do compressor e central) e os dois rotores (da turbina e do compressor).

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carcaça compressora	Rotor do compressor	Carcaça da turbina	Rotor da turbina	Carcaça central	Trava da carcaça	Suporte	Flange	Tampa da Válvula
18,715 KWh	13,496 KWh	12,250 KWh	7,366 KWh	5,475 KWh	1,831 KWh	1,801 KWh	1,350 KWh	1,086 KWh



10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tampa Roscada	Mancal de encosto	Braço da válvula	Corpo da válvula	Mancal radial	Colar	Bucha da válvula	Arruela de encosto	Arruela da válvula
0,890 KWh	0,748 KWh	0,592 KWh	0,577 KWh	0,304 KWh	0,087 KWh	0,072 KWh	0,058 KWh	0,048 KWh

Figura 22 - Consumo de energia direto e aplicação dos componentes analisados

A carcaça compressora, cujo consumo direto de energia é detalhado na Figura 23, é produzida em liga de alumínio e apresenta um consumo total de 18,715 KWh de energia elétrica, não sendo consumida energia térmica em nenhuma operação.

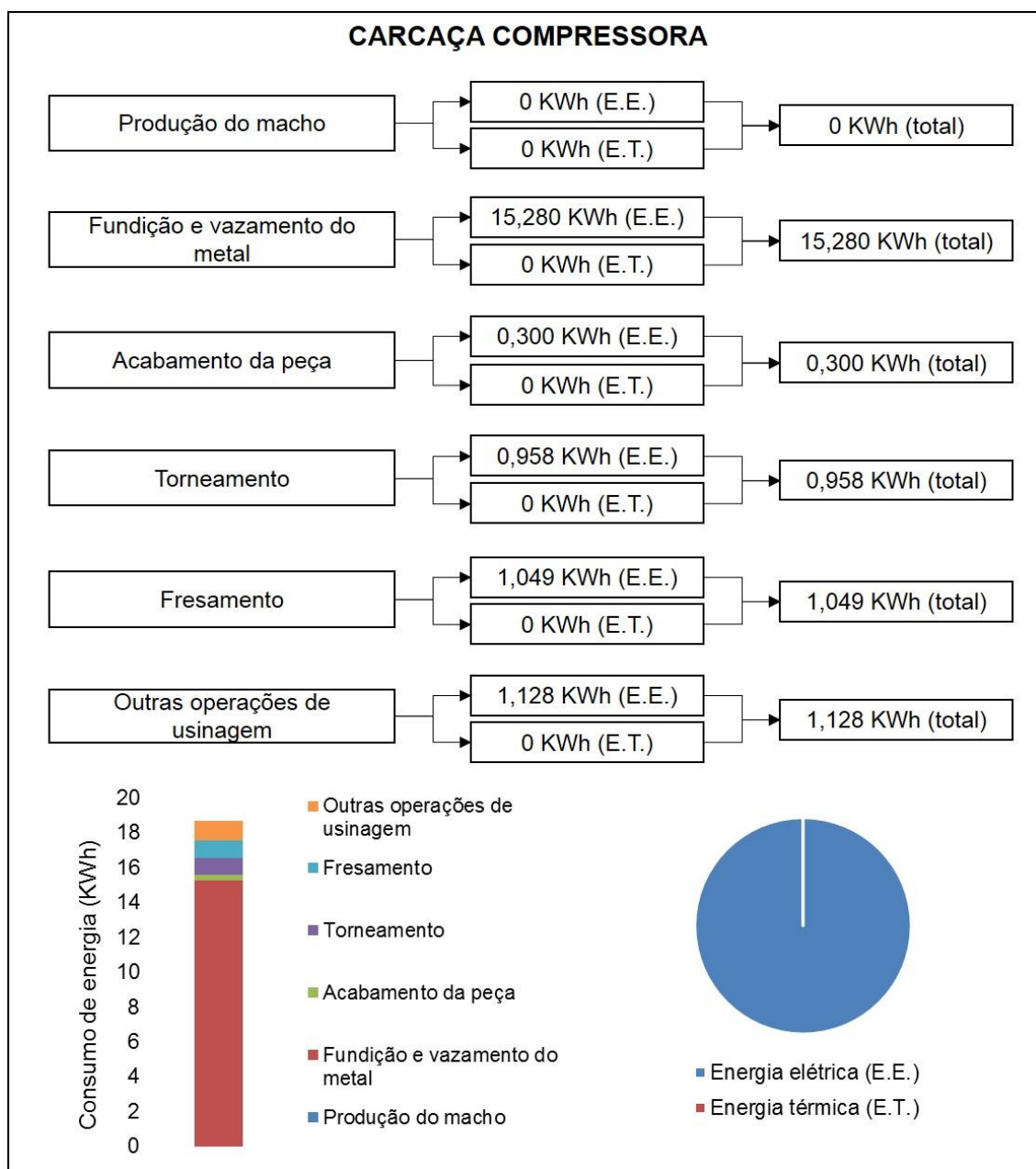


Figura 23 – Consumo de energia para produção da carcaça compressora

A carcaça compressora possui geometria simples, boa usinabilidade e grande volume, quando comparada aos demais componentes. O peso final da peça é de 1,280 Kg, correspondendo a um consumo de aproximadamente 15 KWh/Kg.

O processo de fundição utilizado para a carcaça compressora é a Coquilha e, tendo em vista que esse processo possui poucas etapas, a maior parte do consumo de energia é centralizado na operação de fundição e vazamento do

metal. No processo de usinagem, o consumo de energia é distribuído de maneira semelhante entre as operações de torneamento, fresamento e outras operações que compreendem principalmente acabamento superficial e limpeza da peça final.

O componente com o segundo maior consumo direto de energia, é o rotor do compressor, como representado na Figura 24.

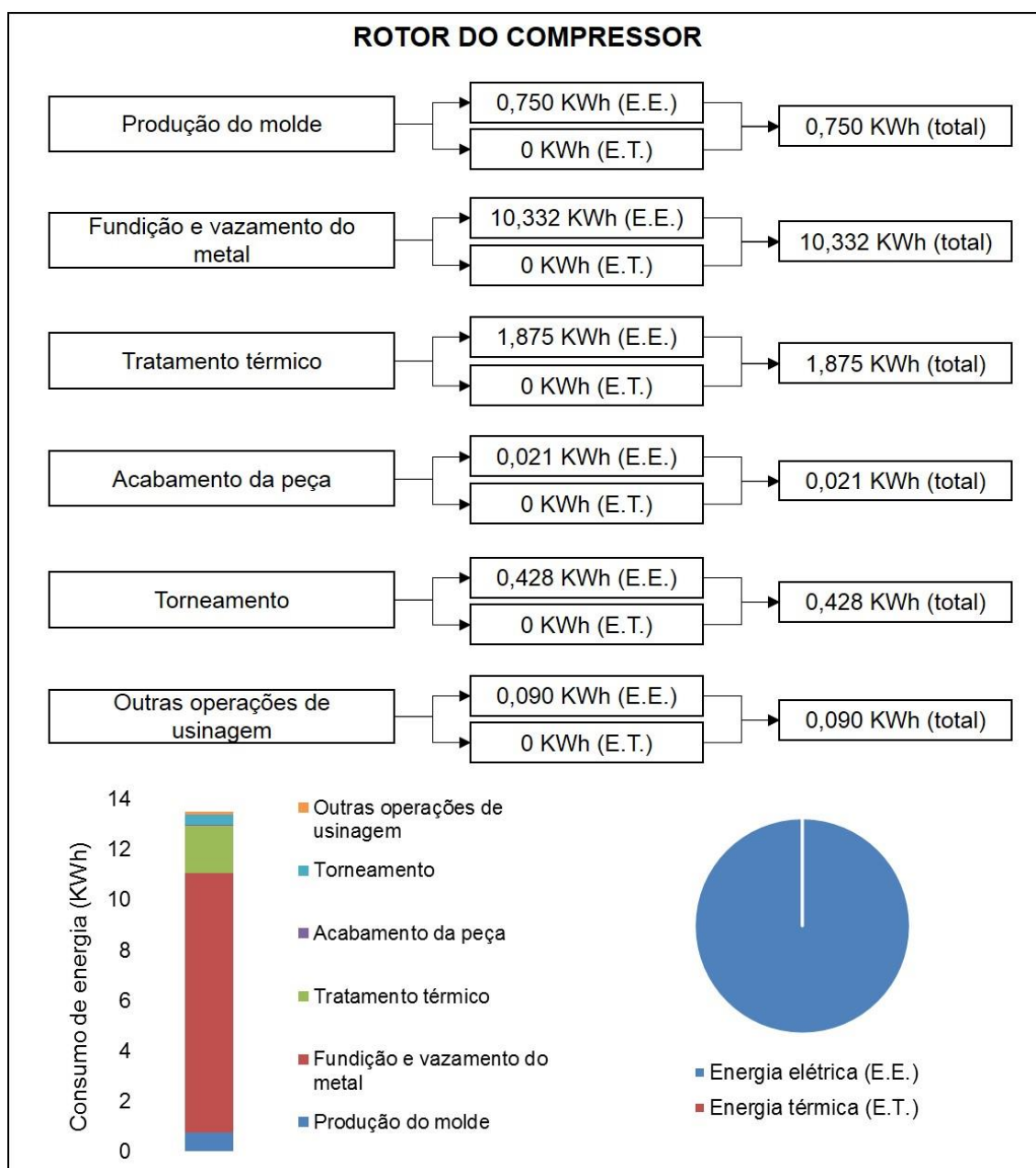


Figura 24 – Consumo de energia para produção do rotor do compressor

O rotor do compressor demanda 13,496 KWh de energia elétrica, possui geometria complexa, é produzido em liga de alumínio e pesa 0,096 Kg. Quando considerado o consumo de energia em relação ao peso do componente, o rotor do compressor possui o maior fator, sendo necessários 135 KWh/Kg de componente produzido.

A produção do rotor do compressor passa pelas operações do processo de fundição em gesso, em que 96,01% da energia é consumida, sendo a maior parte do consumo na operação de fundição e vazamento do metal. Na operação de produção do molde, o consumo ocorre pela utilização de uma estufa para secagem dos moldes em gesso. O tratamento térmico é caracterizado pelo consumo de energia no forno elétrico.

Além do processo de fundição, o rotor do compressor passa por algumas etapas de usinagem, porém o consumo de energia nessas operações é pouco significativo.

Em terceiro lugar, a carcaça da turbina é produzida em aço carbono e as informações do consumo são apresentadas na Figura 25. Esse é o maior componente encontrado no turbocompressor, com o peso de 5,218 Kg e um consumo de 12,250 KWh de energia elétrica e térmica, o que corresponde a 2,3 KWh/Kg de componente produzido.

O processo para a produção da carcaça da turbina é conduzido pela fundição em areia, consumindo energia elétrica e térmica. Assim como os componentes analisados anteriormente, o principal ponto de consumo ocorre nas operações de fundição e vazamento do metal. Nesse processo, o metal é fundido em um forno de indução e, devido às características do metal, é necessário o aquecimento da panela para o vazamento do metal, por meio da combustão de gás natural.

Posteriormente, é no processo de usinagem que ocorre o maior consumo de energia, principalmente nas operações de torneamento e fresamento.

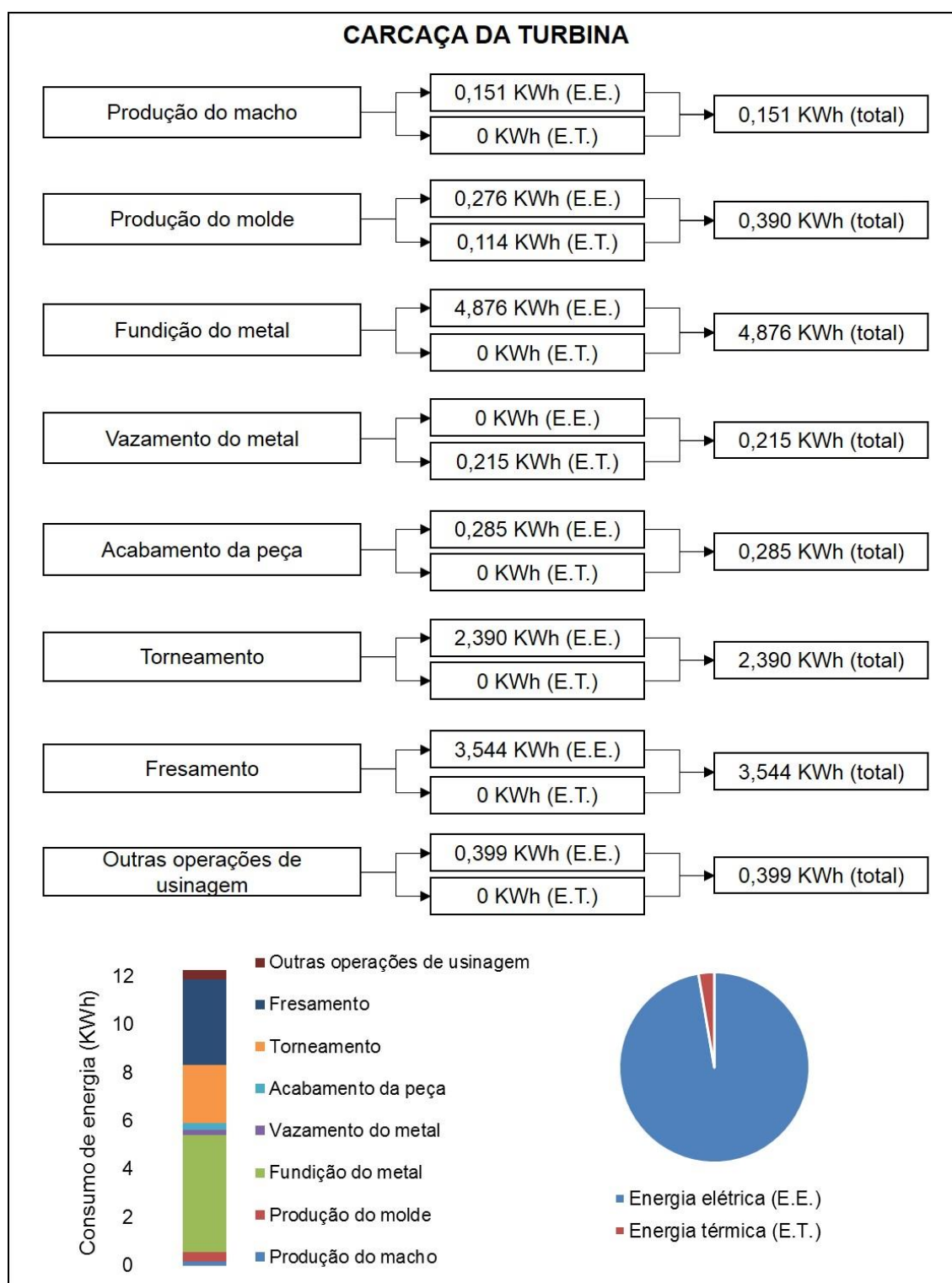


Figura 25 – Consumo de energia para produção da carcaça da turbina

Em seguida, em quarto lugar no consumo de energia (7,366 KWh) e segundo lugar para o consumo por peso de material produzido (21 KWh/Kg), o consumo do rotor da turbina está ilustrado na Figura 26.

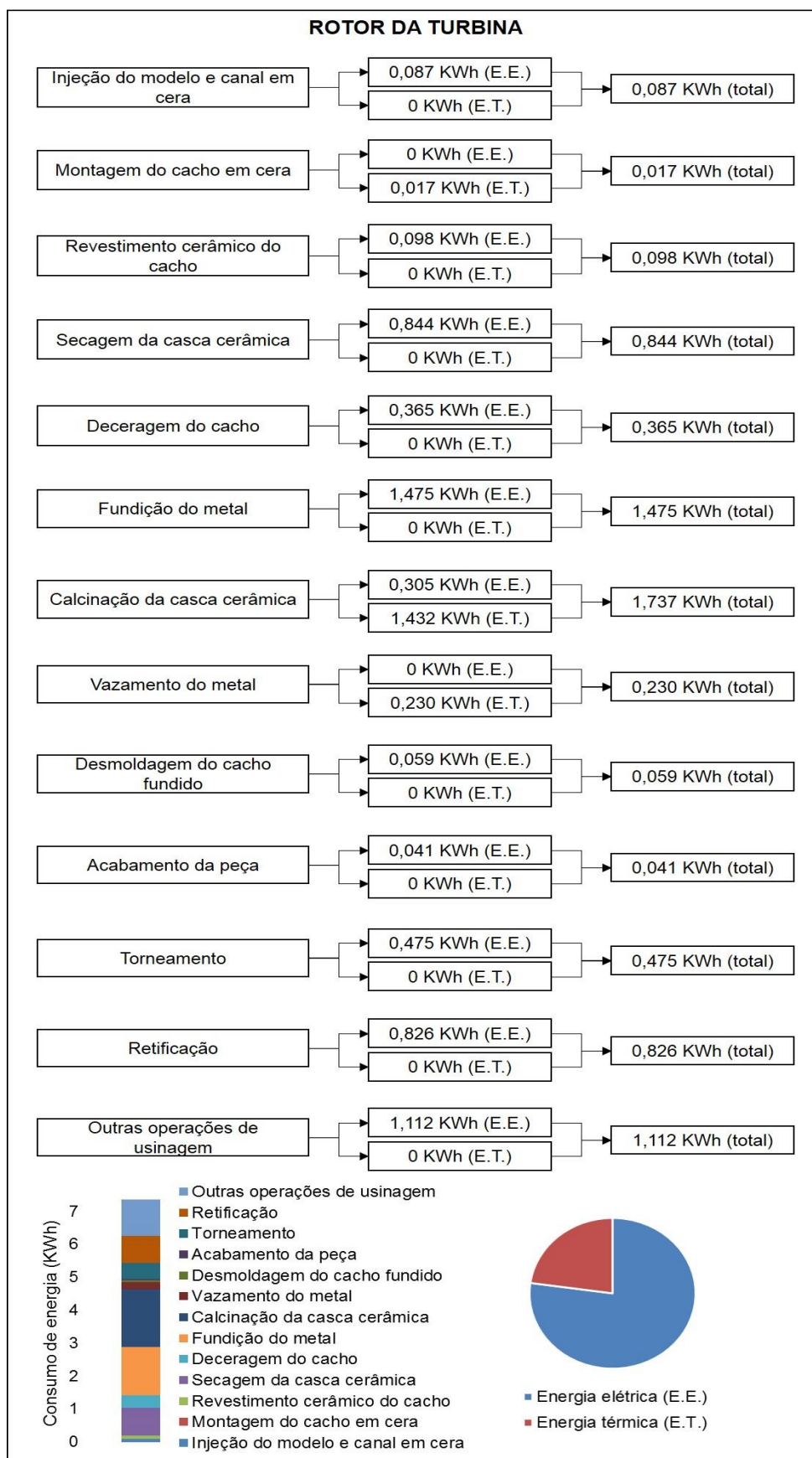


Figura 26 – Consumo de energia para produção do rotor da turbina



O material utilizado no rotor da turbina é uma liga especial com resistência a altas temperaturas e difícil usinagem, tornando-se viável a utilização do processo de microfusão para produção da peça fundida, pois possibilita menor necessidade de usinagem. Ainda assim, as poucas operações de usinagem utilizadas representam 32,76% do consumo, incluindo operações de torneamento, retificação e outras operações, como soldagem por fricção e balanceamento.

O processo de microfusão, utilizado para o rotor da turbina, possui diversas operações e, apesar da dispersão do consumo de energia ao longo das operações, a maior parte do consumo se concentra na etapa de vazamento do metal (fundição do metal, calcinação da casca cerâmica e vazamento do metal). Além disso, na etapa de produção do molde, principalmente na operação de secagem da casca cerâmica, ocorre consumo de energia devido ao uso prolongado de dispositivos para controle da temperatura e umidade do ambiente.

Para a produção da carcaça central, é necessário um total de 5,475 KWh de energia, como representado na Figura 27. A carcaça central possui características similares à carcaça da turbina, incluindo o material, operações realizadas e o consumo médio, que neste caso é de 2,4 KWh/Kg.

No processo de fundição, novamente a operação mais representativa é a fundição do metal (36,78% do consumo total). As operações de produção do molde e vazamento do metal consomem energia térmica por meio da queima de gás natural.

No processo de usinagem, a operação de torneamento demanda 26,30% da energia consumida para a produção da carcaça central, seguido da operação de fresamento (12,76%) e outras operações de usinagem (9,99%), como limpeza e acabamento superficial.



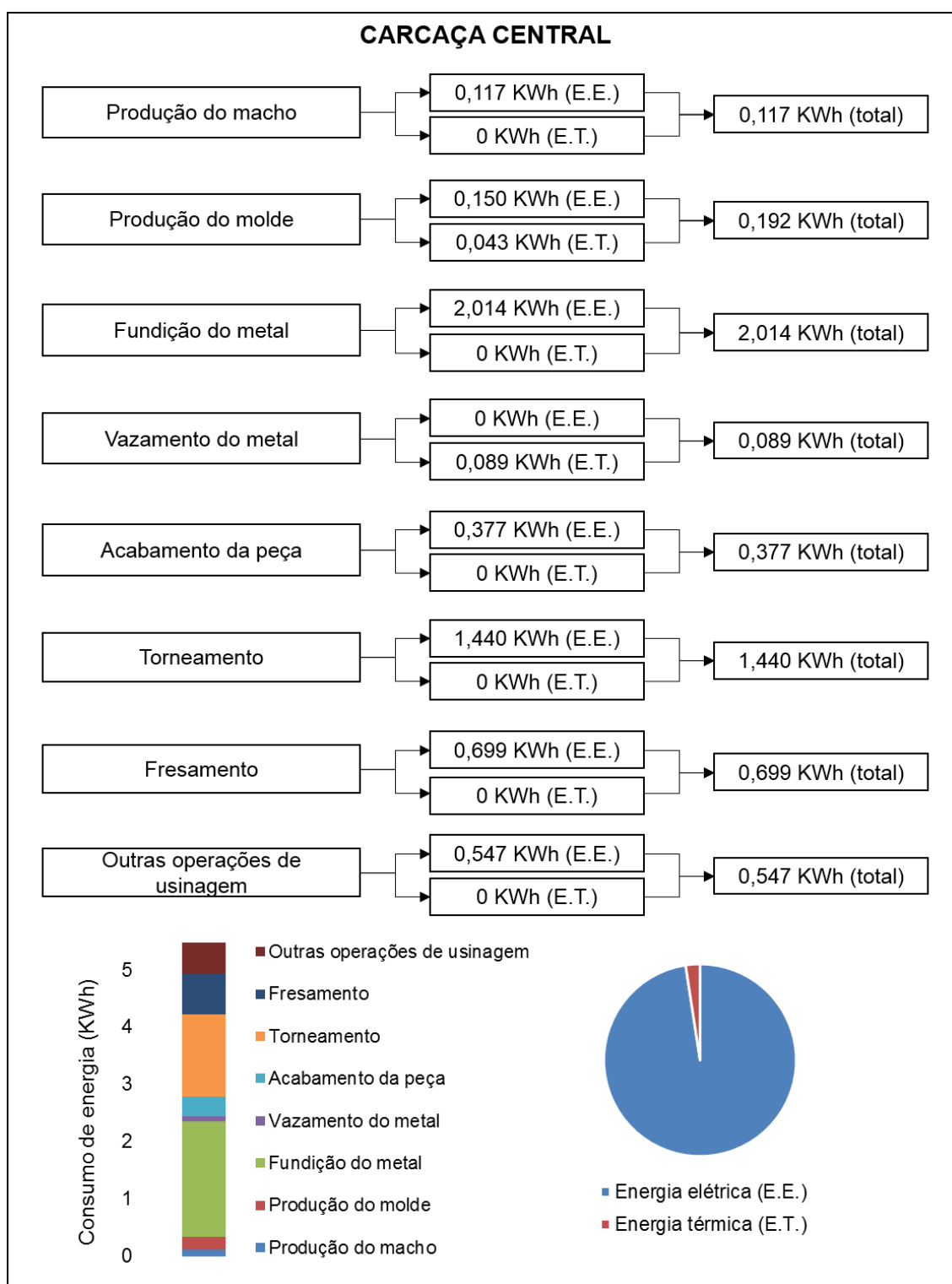


Figura 27 – Consumo de energia para produção da carcaça central

Os demais componentes possuem menor representatividade no consumo de energia do sistema, seja pelo tamanho reduzido, como no caso do braço da

válvula, colar e arruelas, ou pela simplicidade geométrica, como as travas da carcaça e suportes.

Em uma análise mais generalista, extrapolando as operações de produção diretamente associadas aos componentes e abrangendo o consumo de energia na montagem e nos sistemas indireto, a Figura 28 apresenta a distribuição do consumo de energia por todas as etapas do sistema produtivo.

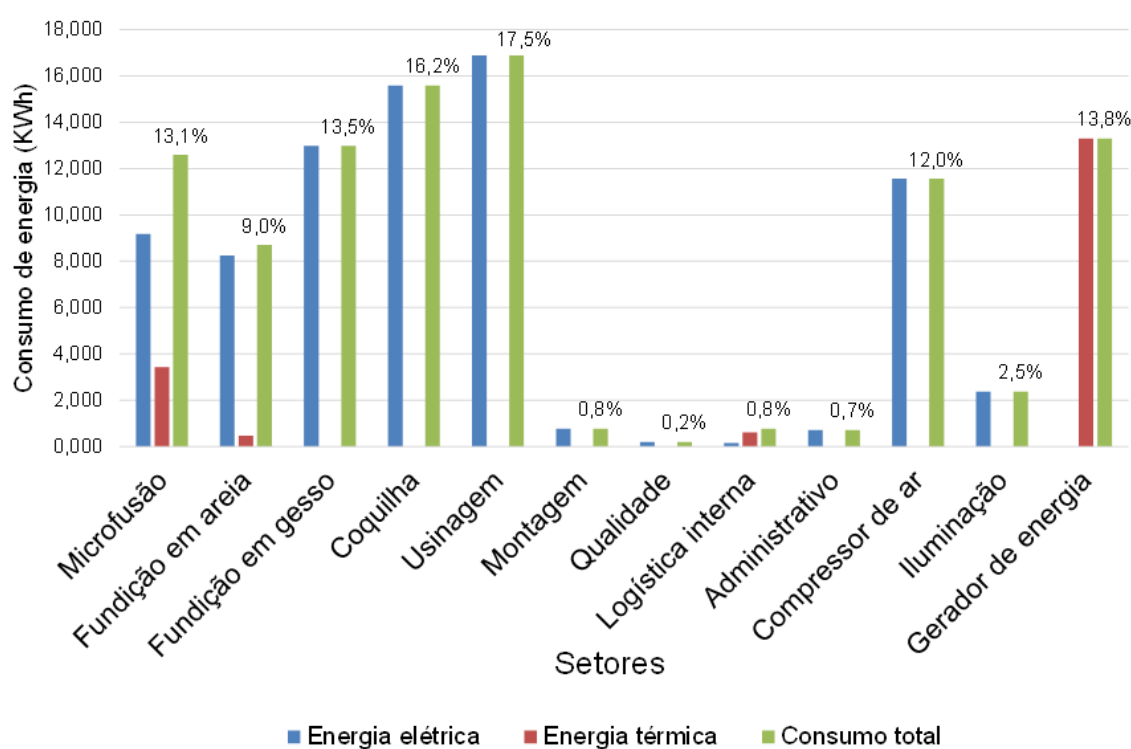


Figura 28 – Distribuição do consumo de energia ao longo do sistema produtivo

Os processos de produção diretamente envolvidos na produção do turbocompressor, com exceção do processo de montagem, demandam a maior parte da energia consumida. Os processos de fundição apresentam um consumo total de 49,862 KWh, o que significa mais da metade de todo o consumo do sistema. Enquanto isso, o processo de usinagem pode ser considerado o processo mais intenso energeticamente; quando analisado individualmente, apresenta um consumo de 16,883 KWh.

Por outro lado, o processo de montagem, juntamente com os sistemas de qualidade, logística interna e administrativo, apresentam consumo pouco representativo. Em uma análise individual, a representatividade de cada um não ultrapassa 0,8% do consumo no sistema, sendo a soma do consumo de 2,437 KWh.

Para o consumo de energia indireto associado às utilidades (compressor de ar, iluminação e gerador de energia), a demanda é de 27,250 KWh. Dentre esses sistemas, o consumo para iluminação possui a menor representatividade (2,378 KWh), enquanto o compressor de ar e gerador de energia, com consumo de 11,569 KWh e 13,304 KWh, respectivamente, possuem grande representatividade no consumo total.

Em relação ao tipo de consumo, a Figura 29 apresenta a distribuição entre o consumo de energia elétrica e térmica. Observa-se que existe a predominância no uso da energia elétrica como fonte de consumo no sistema, responsável por 78,627 KWh, sendo que a energia térmica corresponde a uma parcela reduzida, totalizando 17,805 KWh de energia proveniente da queima de gás natural, óleo diesel e GLP.

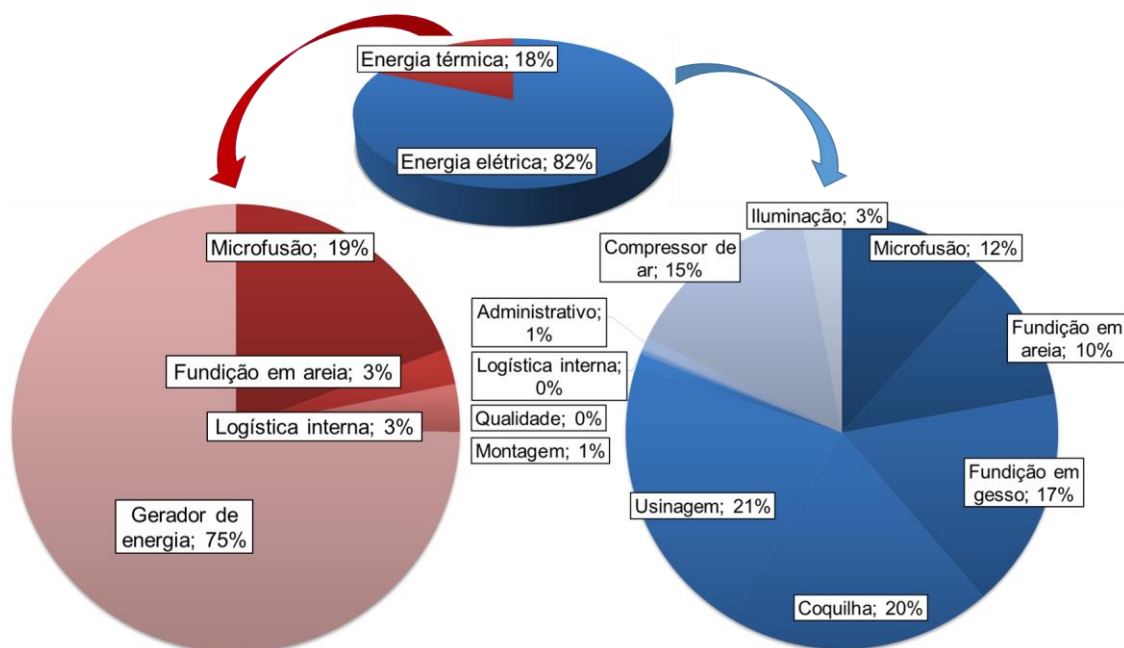


Figura 29 – Distribuição por tipo de consumo ao longo do sistema produtivo

A utilização da energia elétrica está presente em diversas etapas do sistema produtivo, sendo muitas vezes a fonte exclusiva para o funcionamento do processo, como na fundição em gesso, coquilha e usinagem. Por outro lado, a energia térmica é utilizada em quatro etapas do sistema. O consumo de energia térmica ocorre na queima de óleo diesel para o gerador de energia (13,304 KWh), utilização de gás natural na microfusão (3,424 KWh) e fundição em areia (0,461 KWh) e, finalmente, pela queima de GLP nas empilhadeiras para logística interna (0,615 KWh).

#### **4.2.4. AÇÕES PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA MANUFATURA DE TURBOCOMPRESSORES**

Nesta etapa, a empresa tomará como base as análises conduzidas na etapa anterior para estabelecer um plano de ação seguindo critérios internos. Algumas possibilidades são apresentadas a seguir.

O elevado consumo de energia na operação de fundição e vazamento do metal, responsável pela maior parte do consumo na produção da carcaça compressora e do rotor do compressor, é justificado pelo fato que o alumínio é aquecido e mantido constantemente no estado de fusão para o vazamento.

Em um cenário em que os fornos operam apenas em períodos específicos, o consumo de energia poderia ser reduzido. Para isso, será necessário um estudo de viabilidade técnica, visando à manutenção da qualidade do material, bem como uma integração com a programação da produção.

Como possível ação para redução do consumo energético na usinagem, operações podem ser eliminadas com peças fundidas com as características mais próximas do que é especificado para o componente final. Para isso, uma análise deve ser conduzida para verificar a viabilidade da alteração do processo de fundição utilizado, bem como alterações no projeto do componente.

Em relação às utilidades, o consumo com iluminação é baixo em relação aos demais e poderia ser reduzido ainda mais com utilização de iluminação de

LED. Por outro lado, compressor de ar e gerador de energia, com consumo de 11,569 KWh e 13,304 KWh, respectivamente, possuem grande representatividade no consumo total, necessitando de estudos para a otimização no sentido de buscar maior eficiência energética.

Tendo em vista que o grupo gerador de energia é utilizado nos horários de pico, adaptações das rotinas empresariais e otimização na programação das atividades poderiam reduzir a utilização desse recurso. Ainda, estudos para substituição do óleo diesel por gás natural podem apresentar, além de redução no impacto ambiental, melhores resultados financeiros. Da mesma forma, a substituição das empilhadeiras a combustão por empilhadeiras elétricas deve ser considerada.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi apresentado um guia para a quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura, tendo como base a abordagem de ciclo de vida do produto. Ainda, o guia foi aplicado em um sistema de manufatura de turbocompressores, dispositivos de grande relevância no setor de transportes no Brasil.

Para o desenvolvimento metodológico desta pesquisa, no sentido de direcionar as atividades para o cumprimento dos objetivos inicialmente propostos, foi utilizado o *Design Research Methodology* (DRM). Essa metodologia foi conduzida em quatro estágios, possibilitando a apresentação de uma proposta baseada em indícios empíricos e, posteriormente, testando essa proposta em uma aplicação em um caso real.

No que diz respeito ao guia proposto, foi utilizado a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) juntamente com outros aspectos encontrados na literatura para o desenvolvimento das etapas para quantificação do consumo de energia em sistemas de manufatura. A partir da aplicação em um caso real, o guia proposto mostrou-se adequado para este tipo de análise em sistemas produtivos.

O guia está fundamentado em quatro etapas – definição do escopo, levantamento do inventário, análise dos resultados e ações de melhoria. O sistema produtivo é dividido em processos e subdividido em operações, tendo o consumo de energia identificado em cada uma das etapas, permitindo uma visão sistêmica dentro das fronteiras definidas.

Sob uma perspectiva acadêmica, a principal contribuição do presente trabalho ocorre pela supressão da lacuna de ausência de estudos estruturados em uma perspectiva de ciclo de vida do produto para sistemas de manufatura. Também, os resultados da aplicação contribuem para redução na escassez de estudos para eficiência energética em sistemas de manufatura, explorando a produção de turbocompressores.

Do ponto de vista prático, as empresas de manufatura podem se basear no guia proposto para o desenvolvimento de projetos de melhoria na eficiência energética, gerando um diferencial competitivo por meio da redução de custo e melhoria na reputação da empresa.

Para a produção dos turbocompressores, o sistema de manufatura foi dividido entre os processos de produção dos componentes do turbocompressor, constituído por fundições, operações de usinagem e montagem do produto final. Outras formas de consumo indireto de energia foram encontradas no sistema e classificadas como sistemas de apoio e utilidades.

Foram analisadas as operações que constituem a produção dos componentes mais intensivos em consumo de energia, identificando e discutindo os principais destaques encontrados. Na maioria dos casos, as operações relacionadas com a fundição e vazamento do metal são mais energeticamente intensivas do que as demais.

Analisando o sistema como um todo, o consumo de energia para a produção de um turbocompressor é de 96,432 KWh, sendo que mais da metade do consumo de energia é direcionado para os processos de fundição (51,7%), seguido da usinagem (17,5%).

Os sistemas de apoio são pouco significativos no consumo (1,7%), porém as utilidades possuem grande impacto ambiental no sistema (28,3%), principalmente pelo grupo gerador de energia (13,304 KWh).

## **5.1. TRABALHOS FUTUROS**

Como proposta de trabalhos futuros, é importante que o guia passe por implementação em diferentes sistemas de manufatura, possibilitando melhoria de pontos do guia que não foram identificados na presente análise. Ainda, é oportuno que seja explorado o sistema de produção juntamente com as etapas de berço e túmulo do produto, contemplando uma importante característica da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, E. A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 150–168, 2011.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**Rio de Janeiro, 2001.
- ALAM, M. M.; MURAD, M. W.; NOMAN, A. H. M.; OZTURK, I. Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 466–479, 2016.
- ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; BUDZIER, A.; LUNN, D. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. **Energy Policy**, v. 69, p. 43–56, 2014.
- ARANGO, S.; LARSEN, E. R. The environmental paradox in generation: How South America is gradually becoming more dependent on thermal generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2956–2965, 2010.
- ARAÚJO, C. A. Bibliometria : evolução histórica. **Em Questão**, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006.
- BARAN, M. F.; GÖKDOĞAN, O.; OĞUZ, H. İ. Determining the Energy Usage Efficiency of Walnut (*Juglans Regia* L.) Cultivation in Turkey. **Erwerbs-Obstbau**, p. 77–82, 2016.
- BENTON, K.; YANG, X.; WANG, Z. Life cycle energy assessment of a standby diesel generator set. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 265–274, 2017.
- BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A. **DRM, a Design Research Methodology**. Springer London, 2009.



BRUNDTLAND, G. H. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. **United Nations Commission**, v. 4, n. 1, p. 300, 1987.

CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CARVALHO, M. M.; LOPES, A. P. V. B. V.; MARZAGÃO, D. S. L. Biofuels from a strategic standpoint : an overview of the literature. **Latin American Journal of Management for Sustainable Development**, v. 2, n. 1, p. 64–82, 2015.

CASTELLANI, V.; SALA, S.; MIRABELLA, N. Beyond the throwaway society: A life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 11, n. 3, p. 373–382, 2015.

CEBDS. **Consumo eficiente de energia elétrica: uma agenda para o Brasil**. Rio de Janeiro: 2016.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, n. 1, p. 395–413, 2015.

CHEN, W.; YIN, X.; MA, D. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. **Applied Energy**, v. 136, n. 2014, p. 1174–1183, 2014.

CHRISTOFI, A.; CHRISTOFI, P.; SISAYE, S. Corporate sustainability: historical development and reporting practices. **Management Research Review**, v. 35, n. 2, p. 157–172, 2012.

CHUENWONG, K.; CHIARAKORN, S.; SAJJAKULNUKIT, B. Specific energy consumption and carbon intensity of ceramic tablewares: Small enterprises (SEs) in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 395–405, 2017.

CIACCO, E. F. S.; ROCHA, J. R.; COUTINHO, A. R. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. **Applied Thermal Engineering**, v. 113, p. 1283–1289, 2017.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CVETKOVIĆ, S.; KALUĐEROVIĆ RADOIČIĆ, T.; VUKADINOVIĆ, B.; KIJEVČANIN, M. A life cycle energy assessment for biogas energy in Serbia. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 38, n. 20, p. 3095–3102, 2016.

DADDI, T.; NUCCI, B.; IRALDO, F. Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 157–164, 2017.

DELGADO-AGUILAR, M.; TARRÉS, Q.; PÈLACH, M. À.; MUTJÉ, P.; FULLANA-I-PALMER, P. Are Cellulose Nanofibers a Solution for a More Circular Economy of Paper Products? **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 20, p. 12206–12213, 2015.

DENG, Z.; ZHANG, H.; FU, Y.; WAN, L.; LIU, W. Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 1407–1414, 2017.

EKBERG, K.; ERIKSSON, L. Improving Fuel Economy and Acceleration by Electric Turbocharger Control for Heavy Duty Long Haulage. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 11052–11057, 2017.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business**. 1998.

EPE. **Demanda de energia 2050** Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2016. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA\\_13-15\\_Demanda\\_de\\_Energia\\_2050.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA_13-15_Demanda_de_Energia_2050.pdf)>.

EPE. **Balço Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. **Building Research & Information**, v. 28, n. 1, p. 31–41, 2000.

FILIMONAU, V.; DICKINSON, J.; ROBBINS, D.; HUIJBREGTS, M. A. J. Reviewing the carbon footprint analysis of hotels: Life Cycle Energy Analysis (LCEA) as a holistic method for carbon impact appraisal of tourist accommodation. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17–18, p. 1917–1930, 2011.

FILIPCZYK, J. Causes of automotive turbocharger faults. **Transport Problems**, v. 8, n. 2, p. 5–10, 2013.

GIMENEZ, C.; SIERRA, V.; RODON, J. Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 149–159, 2012.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science Technology**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.

GUO, Z. C.; FU, Z. X. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. **Energy**, v. 35, n. 11, p. 4356–4360, 2010.

GUSSOW, M. **Eletricidade básica: coleção Schaum**. 2. ed. São Paulo: 2009.

HILSDORF, W. DE C.; MATTOS, C. A. DE; MACIEL, L. O. DE C. Principles of sustainability and practices in the heavy-duty vehicle industry: A study of multiple cases. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 1231–1239, 2017.

HOLMBERG, K.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; HÄRKISAARI, P.; VALTONEN, K.;

ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. **Tribology International**, v. 115, n. February, p. 116–139, 2017.

HU, L.; PENG, T.; PENG, C.; TANG, R. Energy consumption monitoring for the order fulfilment in a ubiquitous manufacturing environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 9–12, p. 3087–3100, 2017.

IEA. **World Energy Balances: overview**. [s.l.] International Energy Agency, 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 18 out. 2017.

JUÁREZ, A. A.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; OLIVEIRA FILHO, O. D. Q. DE. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 828–834, 2014.

JUNIOR, A. P. DE C. C.; GABRIEL, M. L. D. DA S. Sustentabilidade no transporte rodoviários de carga : re-potencialização da frota de veículos antigos em atividade pelo Brasil. *In: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. São Paulo: USP, 2015.

KARA, S.; BOGDANSKI, G.; LI, W. Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. *In: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Braunschweig: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 1–10.

KARA, S.; LI, W. Unit process energy consumption models for material removal processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 37–40, 2011.

KATSANOS, C. O.; HOUNTALAS, D. T.; ZANNIS, T. C. Simulation of a heavy-duty diesel engine with electrical turbocompounding system using operating charts for turbocharger components and power turbine. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 712–724, 2013.

LAZZARIN, R. M.; NORO, M. Energy efficiency opportunities in the production

process of cast iron foundries: A experience in Italy. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 509–520, 2015.

LEE, S.; YOO, D. G.; JUNG, D.; KIM, J. H. Application of life cycle energy analysis for designing a water distribution network. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 6, p. 1174–1191, 2018.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science**, v. 9, p. 181–211, 2006.

LI, L.; HUANG, H.; ZHAO, F.; LIU, Z. Operation scheduling of multi-hydraulic press system for energy consumption reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1407–1419, 2017.

LOISEAU, E.; SAIKKU, L.; ANTIKAINEN, R.; DROSTE, N.; LESKINEN, P.; KUIKMAN, P.; HANSJÜRGENS, B.; PITK, K.; THOMSEN, M. Green economy and related concepts : An overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 361–371, 2016.

LOPES, A. P. V. B. V.; CARVALHO, M. M. DE. Evolução da literatura de inovação em relações de cooperação: um estudo bibliométrico num período de vinte anos. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p. 203–217, 2012.

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos De Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A. C. C.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MARTINS, R. A.; PUREZA, V. M. M.; MORABITO, R. N.; LIMA, E. P. DE; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R. N.; MARTINS, R. A.; SOUSA, R.; COSTA, S. E. G. DA; PUREZA, V. M. M. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier (ABEPRO), 2012.

MOK, K. Y.; SHEN, G. Q.; YANG, J. Stakeholder management studies in mega construction projects : A review and future directions. **International Journal of**

**Project Management**, v. 33, n. 2, p. 446–457, 2015.

MORADNAZHAD, M.; UNVER, H. O. Energy consumption characteristics of turn-mill machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 5–8, p. 1991–2016, 2017.

MOREIRA, M. F. Failure analysis in aluminium turbocharger wheels. **Engineering Failure Analysis**, v. 61, p. 108–118, 2016.

MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B.; TWOMEY, J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 18–19, p. 4247–4271, 2007.

PARDO, N.; MOYA, J. A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the European Iron & Steel industry. **Energy**, v. 54, p. 113–128, 2013.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, v. 57, n. 2013, p. 95–102, 2013.

PENG, T.; XU, X. Energy consumption evaluation for sustainable manufacturing: A feature-based approach. *In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Shenyang: IEEE, 2014. p. 2310–2315.

PRAJWAL, B.; MALI, H. S.; NAGAR, R. Life cycle energy assessment of a typical marble processing plant. **International Journal of Social Ecology and Sustainable Development**, v. 10, n. 1, p. 31–45, 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: FEEVALE, 2013.

RAKIB, M. I.; SAIDUR, R.; MOHAMAD, E. N.; AFIFI, A. M. Waste-heat utilization – The sustainable technologies to minimize energy consumption in

Bangladesh textile sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1867–1876, 2017.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, 2010.

ROBERT, K. H.; SCHMIDT-BLEEK, B.; ALOISI DE LARDEREL, J.; BASILE, G.; JANSEN, J. L.; KUEHR, R.; PRICE THOMAS, P.; SUZUKI, M.; HAWKEN, P.; WACKERNAGEL, M. Strategic sustainable development - Selection, design and synergies of applied tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 3, p. 197–214, 2002.

SALEH, C.; THOIF, A.; LEUVEANO, R. A. C.; RAHMAN, M. N. A. Assessment and decision making scenario of carbon emission in sugar industry based on energy consumption using system dynamics. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 11, p. 56–64, 2016.

SANQUIST, T. F.; ORR, H.; SHUI, B.; BITTNER, A. C. Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption. **Energy Policy**, v. 42, p. 354–364, 2012.

SCHEEPENS, A. E.; VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, J. C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 257–268, 2016.

SEMLITSCH, B.; WANG, Y.; MIHĂESCU, M. Flow effects due to pulsation in an internal combustion engine exhaust port. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 520–536, 2014.

SESANA, M. M.; SALVALAI, G. Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for ZEBs. **Building and Environment**, v. 67, p. 211–216, 2013.

SHELDON, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. **Green Chemistry**, v. 19, n. 1, p. 18–43, 2016.

SHEN, B.; DING, X.; CHEN, L.; CHAN, H. L. Low carbon supply chain with energy consumption constraints: case studies from China's textile industry and simple analytical model. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 22, n. 3, p. 258–269, 2017.

SHROUF, F.; ORDIERES-MERÉ, J.; GARCÍA-SÁNCHEZ, A.; ORTEGA-MIER, M. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 197–207, 2014.

SILVA, D. A. L.; OLIVEIRA, J. A. DE; PADOVEZI FILLETI, R. A.; GOMES DE OLIVEIRA, J. F.; JANNONE DA SILVA, E.; OMETTO, A. R. Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 286–300, 2018.

SMOLÍK, L.; RENDLOVÁ, Z.; BYRTUS, M. An analysis of the influence of the Titanium compressor wheel on the dynamical properties of the particular turbocharger rotor. **Manufacturing Technology**, v. 15, n. 1, p. 93–99, 2015.

SONG, Y. S.; YOUN, J. R.; GUTOWSKI, T. G. Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. **Composites: Part A**, v. 40, n. 8, p. 1257–1265, 2009.

SUN, H.; HANNA, D.; HU, L.; CURTIS, E.; YI, J.; TJONG, J. Steady State Engine Test Demonstration of Performance Improvement With an Advanced Turbocharger. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 136, n. 7, p. 072601, 2014.

SUNG, S. Y.; KIM, Y. J. Modeling of titanium aluminides turbo-charger casting. **Intermetallics**, v. 15, n. 4, p. 468–474, 2007.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção. **Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI**, p. 191, 2012.

UNESCO. **Intergovernmental Conference of Experts on the Scientific Basis for Rational Use and Conservation of the Resources of the**



**Biosphere**. Paris, 1968.

VAN-ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VITERBO JUNIOR, Ê. **Sistema integrado de gestão**. Editora Ground, 1998.

WANG, S.; WANG, J.; YANG, F.; WANG, Y.; LI, J. Consumer familiarity, ambiguity tolerance, and purchase behavior toward remanufactured products: The implications for remanufacturers. **Business Strategy and the Environment**, n. May, p. 1741–1750, 2018.

WANG, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, B.; YANG, F.; YU, X.; ZHAO, B.; WEI, Y. Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 941–948, 2017.

WOHR, M.; CHEBLI, E.; M??LLER, M.; ZELLBECK, H.; LEWEUX, J.; GORBACH, A. Development of a turbocharger compressor with variable geometry for heavy-duty engines. **International Journal of Engine Research**, v. 16, n. 1, p. 23–30, 2015.

XU, J. H.; FLEITER, T.; EICHHAMMER, W.; FAN, Y. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis. **Energy Policy**, v. 50, p. 821–832, 2012.

YANG, S.; DENG, K.; CUI, Y.; GU, H. A Study on an Automatically Variable Intake Exhaust Injection Timing Turbocharging System for Diesel Engines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 132, n. 5, p. 052803, 2010.

YOON, H. S.; LEE, J. Y.; KIM, H. S.; KIM, M. S.; KIM, E. S.; SHIN, Y. J.; CHU, W. S.; AHN, S. H. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 1, n. 3, p. 261–279, 2014.

ZHANG, Z.; TANG, R.; PENG, T.; TAO, L.; JIA, S. A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1647–1662, 2016.

ZHU, Y.; PENG, T.; JIA, G.; ZHANG, H.; XU, S.; YANG, H. Electrical energy consumption and mechanical properties of selective-laser-melting-produced 316L stainless steel samples using various processing parameters. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 77–85, 2019.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015.

## APÊNDICE A – AMOSTRAS: *WEB OF SCIENCE E SCOPUS*

### *Web of Science*

1. DENG, ZH; ZHANG, H; FU, YH; WAN, LL; LIU, W. Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017.
2. LI, L; HUANG, HH; ZHAO, F; LIU, ZF. Operation scheduling of multi-hydraulic press system for energy consumption reduction, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017.
3. HOLMBERG, K; KIVIKYTO-REPONEN, P; HARKISAARI, P; VALTONEN, K; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry, *TRIBOLOGY INTERNATIONAL*, 2017.
4. MODOS, I; SUCHA, P; HANZALEK, Z. Algorithms for robust production scheduling with energy consumption limits, *COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING*, 2017.
5. RAILEANU, S; ANTON, F; IATAN, A; BORANGIU, T; ANTON, S; MORARIU, O. Resource scheduling based on energy consumption for sustainable manufacturing, *JOURNAL OF INTELLIGENT MANUFACTURING*, 2017.
6. NJOKU, HO; BAFUWA, OR; MGBEMENE, CA; EKECHUKWU, OV. Benchmarking energy utilization in cement manufacturing processes in Nigeria and estimation of savings opportunities, *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 2017.
7. XU, BZ; WANG, Y; JI, ZC. Knowledge network model of the energy consumption in discrete manufacturing system, *MODERN PHYSICS LETTERS B*, 2017.
8. MORADNAZHAD, M; UNVER, HO. Energy consumption characteristics of turn-mill machining, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2017.
9. HAO, H; QIAO, QY; LIU, ZW; ZHAO, FQ. Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case, *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING*, 2017.
10. HU, LK; PENG, T; PENG, C; TANG, RZ. Energy consumption monitoring for the order fulfilment in a ubiquitous manufacturing environment, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2017.
11. CHUENWONG, I; CHIARAKORN, S; SAJJAKULNUKIT, B. Specific energy consumption and carbon intensity of ceramic tablewares: Small enterprises (SEs) in Thailand, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017.
12. HE, KY; TANG, RZ; JIN, MZ. Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS*, 2017.
13. CIACCO, EFS; ROCHA, JR; COUTINHO, AR. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 2017.
14. HU, L; PENG, C; EVANS, S; PENG, T; LIU, Y; TANG, RH; TIWARI, A. Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part, *ENERGY*, 2017.
15. KIM, S. LMDI Decomposition Analysis of Energy Consumption in the Korean Manufacturing Sector, *SUSTAINABILITY*, 2017.

16. SUN, BX; LIU, Y; NIE, ZR; GAO, F; WANG, ZH; GONG, XZ. Physical parameter-based allocation for the energy consumption of pyro-metallurgical system-a case study on nickel production in China, INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT, 2017.
17. JIA, S; TANG, RZ; LV, JX; YUAN, QH; PENG, T. Energy consumption modeling of machining transient states based on finite state machine, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2017.
18. LI, XL; XING, KY; WU, YC; WANG, XN; LUO, JC. Total energy consumption optimization via genetic algorithm in flexible manufacturing systems, COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING, 2017.
19. LV, JX; TANG, RZ; TANG, WCJ; LIU, Y; ZHANG, YF; JIA, S. An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
20. ARABKOOHSAR, A; FARZANEH-GORD, M; GHEZELBASH, R; KOURY, RNN. Energy consumption pattern modification in greenhouses by a hybrid solar-geothermal heating system, JOURNAL OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES AND ENGINEERING, 2017.
21. ARRIAZA, OV; KIM, DW; LEE, DY; SUHAIMI, MA. Trade-off analysis between machining time and energy consumption in impeller NC machining, ROBOTICS AND COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING, 2017.
22. RAKIB, MI; SAIDUR, R; MOHAMAD, EN; AFIFI, AM. Waste-heat utilization - The sustainable technologies to minimize energy consumption in Bangladesh textile sector, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
23. WANG, ZH; ZHANG, YQ; ZHANG, B; YANG, FG; YU, XL; ZHAO, B; WEI, YM. Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2017.
24. KARACIZMELI, IH; OGULATA, SN. ENERGY CONSUMPTION MANAGEMENT IN TEXTILE FINISHING PLANTS: A COST EFFECTIVE AND SEQUENCE DEPENDENT SCHEDULING MODEL, TEKSTIL VE KONFEKSIYON, 2017.
25. JIANG, P; LI, GL; LIU, PX; JIANG, L; LI, XZ. Energy consumption model and energy efficiency evaluation for CNC continuous generating grinding machine tools, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENGINEERING, 2017.
26. SHEN, B; DING, XM; CHEN, LZ; CHAN, HL. Low carbon supply chain with energy consumption constraints: case studies from China's textile industry and simple analytical model, SUPPLY CHAIN MANAGEMENT-AN INTERNATIONAL JOURNAL, 2017.
27. GHODBANAN, S; ALIZADEH, R; SHAFIEI, S. OPTIMIZATION FOR ENERGY CONSUMPTION IN DRYING SECTION OF FLUTING PAPER MACHINE, THERMAL SCIENCE, 2017.
28. DELGADO-GOMES, V; OLIVEIRA-LIMA, JA; MARTINS, JF. Energy consumption awareness in manufacturing and production systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING, 2017.
29. ZHONG, QQ; TANG, RZ; PENG, T. Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
30. PENG, T; XU, X. An interoperable energy consumption analysis system for CNC machining, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.

31. ANDROJIC, I; ALDUK, ZD. Analysis of energy consumption in the production of hot mix asphalt (batch mix plant), CANADIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, 2016.
32. CHONG, D; WANG, YH; CHEN, L; YU, B. Modeling and Validation of Energy Consumption in Asphalt Mixture Production, JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2016.
33. FRANCO, A; RASHED, CAA; ROMOLI, L. Analysis of energy consumption in micro-drilling processes, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
34. BILGA, PS; SINGH, S; KUMAR, R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
35. ZHANG, ZW; TANG, RZ; PENG, T; TAO, LY; JIA, S. A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
36. ZHAO, GY; HOU, CH; QIAO, JF; CHENG, X. Energy consumption characteristics evaluation method in turning, ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, 2016.
37. CAI, W; LIU, F; ZHOU, XN; XIE, J. Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry, ENERGY, 2016.
38. YANG, Y; LI, XY; GAO, L; SHAO, XY. Modeling and impact factors analyzing of energy consumption in CNC face milling using GRASP gene expression programming, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
39. WANG, XL; LUO, W; ZHANG, H; DAN, BB; LI, F. Energy consumption model and its simulation for manufacturing and remanufacturing systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
40. ZHOU, XN; LIU, F; CAI, W. An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
41. SEALY, MP; LIU, ZY; ZHANG, D; GUO, YB; LIU, ZQ. Energy consumption and modeling in precision hard milling, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
42. HERAVI, G; NAFISI, T; MOUSAVI, R. Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings, ENERGY AND BUILDINGS, 2016.
43. ALTINTAS, RS; KAHYA, M; UNVER, HO. Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
44. FENG, LJ; MEARS, L. Energy Consumption Modeling and Analyses in Automotive Manufacturing Plant, JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME, 2016.
45. HUANG, J; LIU, F; XIE, J. A method for determining the energy consumption of machine tools in the spindle start-up process before machining, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2016.
46. GASSNER, M; DE FIGUEIREDO, MR; SCHALK, N; FRANZ, R; WEISS, C; RUDIGIER, H; HOLZSCHUH, H; BURGIN, W; POHLER, M; CZETTL, C; MITTERER, C. Energy consumption and material fluxes in hard coating deposition processes, SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY, 2016.

47. XIE, J; LIU, F; QIU, H. An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2016.
48. WANG, Y; GE, XL; LIU, JL; DING, ZQ. Study and analysis of energy consumption and energy-related carbon emission of industrial in Tianjin, China, *ENERGY STRATEGY REVIEWS*, 2016.
49. SALEH, C; THOIF, A; LEUVEANO, RAC; AB RAHMAN, MN. ASSESSMENT AND DECISION MAKING SCENARIO OF CARBON EMISSION IN SUGAR INDUSTRY BASED ON ENERGY CONSUMPTION USING SYSTEM DYNAMICS, *JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2016.
50. TANG, LX; MENG, Y; CHEN, ZL; LIU, JY. Coil Batching to Improve Productivity and Energy Utilization in Steel Production, *M&SOM-MANUFACTURING & SERVICE OPERATIONS MANAGEMENT*, 2016.
51. ZHONG, QQ; TANG, RZ; LV, JX; JIA, S; JIN, MZ. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2016.
52. MANSOURI, SA; AKTAS, E; BESIKCI, U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption, *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 2016.
53. OZILGEN, M. Energy utilization and carbon dioxide emission during production of snacks, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
54. YANG, FF; LIU, YZ; LIU, GL. A process simulation based benchmarking approach for evaluating energy consumption of a chemical process system, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
55. LV, JX; TANG, RZ; JIA, S; LIU, Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
56. MAGHE, M; CREIGHTON, C; HENDERSON, LC; HUSON, MG; NUNNA, S; ATKISS, S; BYRNE, N; FOX, BL. Using ionic liquids to reduce energy consumption for carbon fibre production, *JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A*, 2016.
57. FEO-GARCIA, J; RUIZ-GARCIA, A; RUIZ-SAAVEDRA, E; MELIAN-MARTEL, N. Energy consumption assessment of 4,000m<sup>3</sup>/d SWRO desalination plants, *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 2016.
58. VINOD, AR; SRINIVASA, CK; KESHAVAMURTHY, R; SHASHIKUMAR, PV. A novel technique for reducing lead-time and energy consumption in fabrication of Inconel-625 parts by laser-based metal deposition process, *RAPID PROTOTYPING JOURNAL*, 2016.
59. HU, JL; CHEN, CP; CHEN, YH; TSO, C. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in Taiwan's iron-steel industries, *ENERGY SOURCES PART B-ECONOMICS PLANNING AND POLICY*, 2016.
60. VUKMIROVIC, DM; LEVIC, JD; FISTES, AZ; COLOVIC, RR; BRLEK, TI; COLOVIC, DS; DURAGIC, OM. Influence of grinding method and grinding intensity of corn on mill energy consumption and pellet quality, *HEMIJSKA INDUSTRIJA*, 2016.
61. TOTH, LR; TORGYIK, T; NAGY, L; ABONYI, J. Multiobjective optimization for efficient energy utilization in batch biodiesel production, *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 2016.
62. XU, X; METEYER, S; PERRY, N; ZHAO, YF. Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2015.

63. HU, LK; TANG, RZ; HE, KY; JIA, S. Estimating machining-related energy consumption of parts at the design phase based on feature technology, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2015.
64. IQBAL, A; ZHANG, HC; KONG, LL; HUSSAIN, G. A rule-based system for trade-off among energy consumption, tool life, and productivity in machining process, *JOURNAL OF INTELLIGENT MANUFACTURING*, 2015.
65. CATALDO, A; SCATTOLINI, R; TOLIO, T. An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant, *CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2015.
66. DOMINGO, R; MARIN, MM; CLAVER, J; CALVO, R. Selection of Cutting Inserts in Dry Machining for Reducing Energy Consumption and CO2 Emissions, *ENERGIES*, 2015.
67. LIU, N; ZHANG, YF; LU, WF. A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2015.
68. ALKAYA, E; DEMIRER, GN. Reducing water and energy consumption in chemical industry by sustainable production approach: a pilot study for polyethylene terephthalate production, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2015.
69. AFKHAMI, B; AKBARIAN, B; BEHESHTI, AN; KAKAEE, AH; SHABANI, B. Energy consumption assessment in a cement production plant, *SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS*, 2015.
70. PARYANTO,; BROSSOG, M; BORNSCHLEGL, M; FRANKE, J. Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2015.
71. SHRIVASTAVA, A; OVERCASH, M; PFEFFERKORN, FE. Prediction of unit process life cycle inventory (UPLCI) energy consumption in a friction stir weld, *JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES*, 2015.
72. NILAKANTAN, JM; HUANG, GQ; PONNAMBALAM, SG. An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2015.
73. XIANG, D; YANG, SY; LI, XX; QIAN, Y. Life cycle assessment of energy consumption and GHG emissions of olefins production from alternative resources in China, *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 2015.
74. SUN, XZ; MINOWA, T; YAMAGUCHI, K; GENCHI, Y. Evaluation of energy consumption and greenhouse gas emissions from poly (phenylactic acid) production using sweet sorghum, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2015.
75. CAMPATELLI, G; SCIPPA, A; LORENZINI, L; SATO, R. Optimal Workpiece Orientation to Reduce the Energy Consumption of a Milling Process, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY*, 2015.
76. CHEN, WY; YIN, X; MA, D. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO2 emissions, *APPLIED ENERGY*, 2014.
77. MA, J; GE, X; CHANG, SI; LEI, S. Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2014.

78. UTLU, Z; HEPBASLI, A. Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 2014.
79. MULLER, G; SUGIYAMA, H; STOCKER, S; SCHMIDT, R. Reducing Energy Consumption in Pharmaceutical Production Processes: Framework and Case Study, *JOURNAL OF PHARMACEUTICAL INNOVATION*, 2014.
80. YOON, HS; LEE, JY; KIM, HS; KIM, MS; KIM, ES; SHIN, YJ; CHU, WS; AHN, SH. A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY*, 2014.
81. ATMACA, A; YUMRUTAS, R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 2014.
82. KARALI, N; XU, TF; SATHAYE, J. Reducing energy consumption and CO2 emissions by energy efficiency measures and international trading: A bottom-up modeling for the US iron and steel sector, *APPLIED ENERGY*, 2014.
83. SHROUF, F; ORDIERES-MERE, J; GARCIA-SANCHEZ, A; ORTEGA-MIER, M. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2014.
84. LI, YF; HE, Y; WANG, Y; YAN, P; LIU, XH. A framework for characterising energy consumption of machining manufacturing systems, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2014.
85. SMYKSY, K; BRZEZINSKI, M. THE ENERGY CONSUMPTION ASPECTS IN THE VACUUM ASSISTED MOULDING PROCESS, *ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS*, 2014.
86. HIBINO, H; SAKUMA, T; YAMAGUCHI, M. Manufacturing system simulation for evaluation of productivity and energy consumption, *JOURNAL OF ADVANCED MECHANICAL DESIGN SYSTEMS AND MANUFACTURING*, 2014.
87. PORZIO, GF; FORNAI, B; AMATO, A; MATARESE, N; VANNUCCI, M; CHIAPPELLI, L; COLLA, V. Reducing the energy consumption and CO2 emissions of energy intensive industries through decision support systems - An example of application to the steel industry, *APPLIED ENERGY*, 2013.
88. GIORLEO, L; CERETTI, E; GIARDINI, C. Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES*, 2013.
89. SEOW, Y; RAHIMIFARD, S; WOOLLEY, E. Simulation of energy consumption in the manufacture of a product, *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING*, 2013.
90. ANSARI, N; SEIFI, A. A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios, *ENERGY POLICY*, 2013.
91. BAUMERS, M; TUCK, C; WILDMAN, R; ASHCROFT, I; ROSAMOND, E; HAGUE, R. Transparency Built-in Energy Consumption and Cost Estimation for Additive Manufacturing, *JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY*, 2013.
92. GONZALEZ-RAMIREZ, JE; LEDUCQ, D; ARELLANO, M; ALVAREZ, G. Energy consumption optimization of a continuous ice cream process, *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 2013.
93. HOLMBERG, K; SIILASTO, R; LAITINEN, T; ANDERSSON, P; JASBERG, A. Global energy consumption due to friction in paper machines, *TRIBOLOGY INTERNATIONAL*, 2013.



94. WANG, P; JIANG, ZY; LIU, ZT; FU, SH. Modeling and Optimizing Energy Utilization of Steel Production Process: A Hybrid Petri Net Approach, ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, 2013.
95. DUNN, JB; GAINES, L; SULLIVAN, J; WANG, MQ. Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2012.
96. XU, JH; FLEITER, T; EICHHAMMER, W; FAN, Y. Energy consumption and CO2 emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis, ENERGY POLICY, 2012.
97. YILDIRIM, MB; MOUZON, G. Single-Machine Sustainable Production Planning to Minimize Total Energy Consumption and Total Completion Time Using a Multiple Objective Genetic Algorithm, IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT, 2012.
98. BI, ZM; WANG, LH. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study, JOURNAL OF MANUFACTURING SYSTEMS, 2012.
99. JANOVSKA, K; VILAMOVA, S; BESTA, P; SAMOLEJOVA, A; VOZNAKOVA, I. DETERMINATION OF COMPLEX ENERGY CONSUMPTION OF METALLURGICAL PRODUCTION ON THE BASE OF MATHEMATICAL MODELLING OF INTERDISCIPLINARY LINKAGES, METALURGIJA, 2012.
100. WANG, T; LEE, IS; KENDALL, A; HARVEY, J; LEE, EB; KIM, C. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.
101. QUINTEIRO, P; ARAUJO, A; DIAS, AC; OLIVEIRA, B; ARROJA, L. Allocation of energy consumption and greenhouse gas emissions in the production of earthenware ceramic pieces, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.
102. QUINTEIRO, P; ARAUJO, A; OLIVEIRA, B; DIAS, AC; ARROJA, L. The carbon footprint and energy consumption of a commercially produced earthenware ceramic piece, JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY, 2012.
103. ANSARI, N; SEIFI, A. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry, ENERGY, 2012.
104. ALVES, HJ; MELCHIADES, FG; BOSCHI, AO. Thermal Energy Consumption and CO2 Emissions in the Fabrication of Ceramic Tiles in Brazil, CFI-CERAMIC FORUM INTERNATIONAL, 2012.
105. ATMACA, A; KANOGLU, M. Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry, ENERGY, 2012.
106. HOSTEN, C; FIDAN, B. An industrial comparative study of cement clinker grinding systems regarding the specific energy consumption and cement properties, POWDER TECHNOLOGY, 2012.
107. SORGUVEN, E; OZILGEN, M. Energy utilization, carbon dioxide emission, and exergy loss in flavored yogurt production process, ENERGY, 2012.
108. SHEINBAUM-PARDO, C; MORA-PEREZ, S; ROBLES-MORALES, G. Decomposition of energy consumption and CO2 emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008, ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2012.
109. HE, Y; LIU, B; ZHANG, XD; GAO, H; LIU, XH. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.

110. HE, Y; LIU, F; WU, T; ZHONG, FP; PENG, B. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2012.
111. BEHRENDT, T; ZEIN, A; MIN, S. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2012.
112. BAUMERS, M; TUCK, C; BOURELL, DL; SREENIVASAN, R; HAGUE, R. Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2011.
113. LI, W; KARA, S. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2011.
114. KARAKAYA, A; OZILGEN, M. Energy utilization and carbon dioxide emission in the fresh, paste, whole-peeled, diced, and juiced tomato production processes, ENERGY, 2011.
115. TANGTHIENG, C. Effect of tube diameter on the specific energy consumption of the ice making process, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2011.
116. PASQUALINO, J; MENESES, M; CASTELLS, F. The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal, JOURNAL OF FOOD ENGINEERING, 2011.
117. WANG, WL; YUAN, CF; MENG, QN; HUANG, XW. Study on Energy Consumption Model Based on Product Formation in Iron and Steel Industry, ADVANCED SCIENCE LETTERS, 2011.
118. UASUF, A; BECKER, G. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina, BIOMASS & BIOENERGY, 2011.
119. KARA, S; LI, W. Unit process energy consumption models for material removal processes, CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2011.
120. GUO, ZC; FU, ZX. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China, ENERGY, 2010.
121. SUN, WQ; CAI, JJ; DU, T; ZHANG, DW. Specific Energy Consumption Analysis Model and Its Application in Typical Steel Manufacturing Process, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 2010.
122. YU, JL; WILLIAMS, E; JU, MT. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China, ENERGY POLICY, 2010.
123. PALAMUTCU, S. Electric energy consumption in the cotton textile processing stages, ENERGY, 2010.
124. REDDY, BS; RAY, BK. Decomposition of energy consumption and energy intensity in Indian manufacturing industries, ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2010.
125. KOCABAS, AM; YUKSELER, H; DILEK, FB; YETIS, U. Adoption of European Union's IPPC Directive to a textile mill: Analysis of water and energy consumption, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 2009.
126. KHANNA, V; BAKSHI, BR; LEE, LJ. Carbon nanofiber production: Life cycle energy consumption and environmental impact, JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, 2008.

127. LAU, HCW; CHENG, ENM; LEE, CKM; HO, GTS. A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system, *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 2008.
128. YU, QB; LU, ZW; CAI, JJ. Calculating method for influence of material flow on energy consumption in steel manufacturing process, *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL*, 2007.
129. MOUZON, G; YILDIRIM, MB; TWOMEY, J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2007.
130. ZHANG, BJ; HUA, B. Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2007.

### **Scopus**

1. HU, L; LIU, Y; LOHSE, N; TANG, R; LV, J; PENG, C; EVANS, S. Sequencing the features to minimise the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed, *ENERGY*, 2017.
2. DENG, Z; ZHANG, H; FU, Y; WAN, L; LIU, W. Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017.
3. LI, L; HUANG, H; ZHAO, F; LIU, Z. Operation scheduling of multi-hydraulic press system for energy consumption reduction, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2017.
4. MÓDOS, I; ŠŮCHA, P; HANZÁLEK, Z. Algorithms for robust production scheduling with energy consumption limits, *COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING*, 2017.
5. RAILEANU, S; ANTON, F; IATAN, A; BORANGIU, T; ANTON, S; MORARIU, O. Resource scheduling based on energy consumption for sustainable manufacturing, *JOURNAL OF INTELLIGENT MANUFACTURING*, 2017.
6. JIANG, P; LI, G; LIU, P; JIANG, L; LI, X. Energy consumption model and energy efficiency evaluation for CNC continuous generating grinding machine tools, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENGINEERING*, 2017.
7. CHATURVEDI, N.D. Minimizing energy consumption via multiple installations aggregate production planning, *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 2017.
8. NJOKU, H.O; BAFUWA, O.R; MGBEMENE, C.A; EKECHUKWU, O.V. Benchmarking energy utilization in cement manufacturing processes in Nigeria and estimation of savings opportunities, *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 2017.
9. MORADNAZHAD, M; UNVER, H.O. Energy consumption characteristics of turn-mill machining, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2017.
10. JIA, Z.-H; ZHANG, Y.-L; LEUNG, J.Y.-T; LI, K. Bi-criteria ant colony optimization algorithm for minimizing makespan and energy consumption on parallel batch machines, *APPLIED SOFT COMPUTING JOURNAL*, 2017.
11. HU, L; PENG, T; PENG, C; TANG, R. Energy consumption monitoring for the order fulfilment in a ubiquitous manufacturing environment, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2017.

12. CIACCO, E.F.S; ROCHA, J.R; COUTINHO, A.R. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2017.
13. SUN, B; LIU, Y; NIE, Z; GAO, F; WANG, Z; GONG, X. Physical parameter-based allocation for the energy consumption of pyro-metallurgical system—a case study on nickel production in China, INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT, 2017.
14. ARRIAZA, O.V; KIM, D.-W; LEE, D.Y; SUHAIMI, M.A. Trade-off analysis between machining time and energy consumption in impeller NC machining, ROBOTICS AND COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING, 2017.
15. JIA, S; TANG, R; LV, J; YUAN, Q; PENG, T. Energy consumption modeling of machining transient states based on finite state machine, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2017.
16. LI, X; XING, K; WU, Y; WANG, X; LUO, J. Total energy consumption optimization via genetic algorithm in flexible manufacturing systems, COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 2017.
17. LV, J; TANG, R; TANG, W; LIU, Y; ZHANG, Y; JIA, S. An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
18. RAKIB, M.I; SAIDUR, R; MOHAMAD, E.N; AFIFI, A.M. Waste-heat utilization – The sustainable technologies to minimize energy consumption in Bangladesh textile sector, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
19. WANG, Z; ZHANG, Y; ZHANG, B; YANG, F; YU, X; ZHAO, B; WEI, Y. Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2017.
20. DELGADO-GOMES, V; OLIVEIRA-LIMA, J.A; MARTINS, J.F. Energy consumption awareness in manufacturing and production systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING, 2017.
21. OWODUNNI, O. Awareness of Energy Consumption in Manufacturing processes, PROCEDIA MANUFACTURING, 2017.
22. KARACIZMELI, I.H; OGULATA, S.N. Energy consumption management in textile finishing plants: A cost effective and sequence dependent scheduling model, TEKSTIL VE KONFEKSIYON, 2017.
23. HOLMBERG, K; KIVIKYTÖ-REPONEN, P; HÄRKISAARI, P; VALTONEN, K; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry, TRIBOLOGY INTERNATIONAL, 2017.
24. GHODBANAN, S; ALIZADEH, R; SHAFIEI, S. Optimization for energy consumption in drying section of fluting paper machine, THERMAL SCIENCE, 2017.
25. ZHONG, Q; TANG, R; PENG, T. Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
26. FUJISHIMA, M; SHIMANOE, H; MORI, M. Reducing the energy consumption of machine tools, INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMATION TECHNOLOGY, 2017.
27. PENG, T; XU, X. An interoperable energy consumption analysis system for CNC machining, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2017.
28. HAUF, D; KRUCK, J; PARYANTO,, FRANKE, J. Energy Consumption Modeling of a Turning Table and Standardized Integration into Virtual Commissioning, PROCEDIA MANUFACTURING, 2017.

29. HE, K; TANG, R; ZHANG, Z; SUN, W. Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing, JOURNAL OF COMPUTING AND INFORMATION SCIENCE IN ENGINEERING, 2016.
30. ZHANG, Z; TANG, R; PENG, T; TAO, L; JIA, S. A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
31. BILGA, P.S; SINGH, S; KUMAR, R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
32. FRANCO, A; RASHED, C.A.A; ROMOLI, L. Analysis of energy consumption in micro-drilling processes, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
33. WANG, X; LUO, W; ZHANG, H; DAN, B; LI, F. Energy consumption model and its simulation for manufacturing and remanufacturing systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
34. SEALY, M.P; LIU, Z.Y; ZHANG, D; GUO, Y.B; LIU, Z.Q. Energy consumption and modeling in precision hard milling, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
35. ZHOU, X; LIU, F; CAI, W. An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
36. ZHAO, G; HOU, C; QIAO, J; CHENG, X. Energy consumption characteristics evaluation method in turning, ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, 2016.
37. LI, Z; TANG, Q; ZHANG, L. Minimizing energy consumption and cycle time in two-sided robotic assembly line systems using restarted simulated annealing algorithm, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016.
38. CAI, W; LIU, F; ZHOU, X; XIE, J. Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry, ENERGY, 2016.
39. YANG, Y; LI, X; GAO, L; SHAO, X. Modeling and impact factors analyzing of energy consumption in CNC face milling using GRASP gene expression programming, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
40. ABEYKOON, C; KELLY, A.L; BROWN, E.C; COATES, P.D. The effect of materials, process settings and screw geometry on energy consumption and melt temperature in single screw extrusion, APPLIED ENERGY, 2016.
41. FENG, L; MEARS, L. Energy Consumption Modeling and Analyses in Automotive Manufacturing Plant, JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, TRANSACTIONS OF THE ASME, 2016.
42. ALTINTAŞ, R.S; KAHYA, M; AĖNER, H.Ė. Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016.
43. WANG, J; QIAO, F; ZHAO, F; SUTHERLAND, J.W. A Data-Driven Model for Energy Consumption in the Sintering Process, JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, TRANSACTIONS OF THE ASME, 2016.
44. HUANG, J; LIU, F; XIE, J. A method for determining the energy consumption of machine tools in the spindle start-up process before machining, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, PART B: JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2016.

45. LIU, Y; DONG, H; LOHSE, N; PETROVIC, S. A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS*, 2016.
46. SEOW, Y; GOFFIN, N; RAHIMIFARD, S; WOOLLEY, E. A 'Design for Energy Minimization' approach to reduce energy consumption during the manufacturing phase, *ENERGY*, 2016.
47. GASSNER, M; REBELO, DE, FIGUEIREDO, M; SCHALK, N; FRANZ, R; WEIß, C; RUDIGIER, H; HOLZSCHUH, H; BÜRGIN, W; POHLER, M; CZETTL, C; MITTERER, C. Energy consumption and material fluxes in hard coating deposition processes, *SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY*, 2016.
48. XIE, J; LIU, F; QIU, H. An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2016.
49. LIU, Z.Y; GUO, Y.B; SEALY, M.P; LIU, Z.Q. Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression, *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, 2016.
50. CAMPOSECO-NEGRETE, C; DE, DIOS, CALDERÓN, NÁJERA, J; MIRANDA-VALENZUELA, J.C. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2016.
51. TANG, L; MENG, Y; CHEN, Z.-L; LIU, J. Coil batching to improve productivity and energy utilization in steel production, *MANUFACTURING AND SERVICE OPERATIONS MANAGEMENT*, 2016.
52. ZHONG, Q; TANG, R; LV, J; JIA, S; JIN, M. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2016.
53. ÖZILGEN, M. Energy utilization and carbon dioxide emission during production of snacks, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
54. BAGUDANCH, I; GARCIA-ROMEU, M.L; SABATER, M. Incremental forming of polymers: Process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
55. GHODBANAN, S; ALIZADEH, R; SHAFIEI, S. Optimization for energy consumption in drying section of fluting paper machine, *THERMAL SCIENCE*, 2016.
56. MANSOURI, S.A; AKTAS, E. Minimizing Energy consumption and makespan in a two-machine flowshop scheduling problem, *JOURNAL OF THE OPERATIONAL RESEARCH SOCIETY*, 2016.
57. MANSOURI, S.A; AKTAS, E; BESIKCI, U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption, *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 2016.
58. JACKSON, M.A; VAN, ASTEN, A; MORROW, J.D; MIN, S; PFEFFERKORN, F.E. A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing, *PROCEDIA MANUFACTURING*, 2016.
59. LV, J; TANG, R; JIA, S; LIU, Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2016.
60. XU, X; METEYER, S; PERRY, N; ZHAO, Y.F. Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2015.

61. CATALDO, A; SCATTOLINI, R; TOLIO, T. An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant, CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2015.
62. ZHANG, Y; ZOU, P; LI, B; LIANG, S. Study on optimized principles of process parameters for environmentally friendly machining austenitic stainless steel with high efficiency and little energy consumption, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2015.
63. AFKHAMI, B; AKBARIAN, B; BEHESHTI, A. N; KAKAEE, A.H; SHABANI, B. Energy consumption assessment in a cement production plant, SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS, 2015.
64. PARYANTO,, BROSSOG, M; BORNSCHLEGL, M; FRANKE, J. Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2015.
65. SCHMIDT, C; LI, W; THIEDE, S; KARA, S; HERRMANN, C. A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING - GREEN TECHNOLOGY, 2015.
66. RIBEIRO, I; PEÇAS, P; HENRIQUES, E. Modelling the energy consumption in the injection moulding process, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE MANUFACTURING, 2015.
67. DOMINGO, R; MARÍN, M.M; CLAVER, J; CALVO, R. Selection of cutting inserts in dry machining for reducing energy consumption and CO2 emissions, ENERGIES, 2015.
68. LIU, N; ZHANG, Y.F; LU, W.F. A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: A milling case, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2015.
69. CAMPATELLI, G; SCIPPA, A; LORENZINI, L; SATO, R. Optimal workpiece orientation to reduce the energy consumption of a milling process, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING - GREEN TECHNOLOGY, 2015.
70. WEI, Z; XUEMEI, Y; FUSHENG, D; YINGQIU, X. An empirical study of the reducing the energy consumption and pollutant emission in cement industry in China, INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTH SCIENCES AND ENGINEERING, 2015.
71. CAMPOSECO-NEGRETE, C. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2015.
72. ALKAYA, E; DEMIRER, G.N. Reducing water and energy consumption in chemical industry by sustainable production approach: A pilot study for polyethylene terephthalate production, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2015.
73. UTLU, Z; HEPBAŞLI, A. Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2014.
74. SHROUF, F; ORDIERES-MERÉ, J; GARCÍA-SÁNCHEZ, A; ORTEGA-MIER, M. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2014.
75. WANG, Q; LIU, F; WANG, X. Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2014.

76. LIU, Y; DONG, H; LOHSE, N; PETROVIC, S; GINDY, N. An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2014.
77. LI, Y; HE, Y; WANG, Y; YAN, P; LIU, X. A framework for characterising energy consumption of machining manufacturing systems, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 2014.
78. DING, H; GUO, D; CHENG, K; CUI, Q. An investigation on quantitative analysis of energy consumption and carbon footprint in the grinding process, *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, PART B: JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE*, 2014.
79. LESOVIK, V.S; ALFIMOVA, N.I; TRUNOV, P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement, *RESEARCH JOURNAL OF APPLIED SCIENCES*, 2014.
80. PANTALEO, A; PELLERANO, A. Assessment of wood particleboards milling by means of energy consumption tests, *WOOD MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING*, 2014.
81. YOON, H.-S; LEE, J.-Y; KIM, H.-S; KIM, M.-S; KIM, E.-S; SHIN, Y.-J; CHU, W.-S; AHN, S.-H. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING - GREEN TECHNOLOGY*, 2014.
82. WANG, Q; WANG, X; YANG, S. Energy consumption modelling of the machining system based on petri net, *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*, 2014.
83. TUO, L; ZHENG, X; CHEN, X. Energy consumption prediction of discrete manufacturing process, *ENERGY EDUCATION SCIENCE AND TECHNOLOGY PART A: ENERGY SCIENCE AND RESEARCH*, 2014.
84. SCHNEEBERGER, M; LEUK, P; HIRN, U; BAUER, W; FISERA, P. Paper drying: A simulation model to optimize the energy consumption, *INTERNATIONAL PAPERWORLD IPW*, 2014.
85. SMYKSY, K; BRZEZIŃSKI, M. The energy consumption aspects in the vacuum assisted moulding process, *ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS*, 2014.
86. YOON, H.-S; KIM, E.-S; KIM, M.-S; LEE, G.-B; AHN, S.-H. Energy consumption of the brushing process for PCB manufacturing based on a friction model, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING*, 2014.
87. ATMACA, A; YUMRUTAŞ, R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 2014.
88. OHARA, K; TSUGENO, M; IMANARI, H; SAKIYAMA, Y; KITAGOH, K; YANAGIMOTO, J. Process optimization for the manufacturing of sheets with estimated balance between product quality and energy consumption, *CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2014.
89. MA, J; GE, X; CHANG, S.I; LEI, S. Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2014.
90. MÜLLER, G; SUGIYAMA, H; STOCKER, S; SCHMIDT, R. Reducing energy consumption in pharmaceutical production processes: Framework and case study, *JOURNAL OF PHARMACEUTICAL INNOVATION*, 2014.



91. HIBINO, H; SAKUMA, T; YAMAGUCHI, M. Manufacturing system simulation for evaluation of productivity and energy consumption, *JOURNAL OF ADVANCED MECHANICAL DESIGN, SYSTEMS AND MANUFACTURING*, 2014.
92. BREVICK, J.R; MOUNT-CAMPBELL, A.F; MOUNT-CAMPBELL, C.A; HORN, A.J. Modeling alloy and energy utilization in high volume die casting, *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 2014.
93. WANG, P; JIANG, Z; LIU, Z; FU, S. Modeling and optimizing energy utilization of steel production process: A Hybrid Petri Net approach, *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*, 2013.
94. O'DRISCOLL, E; CUSACK, D.Ó; O'DONNELL, G.E. The characterisation of energy consumption in manufacturing facilities - A hierarchical approach, *INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMATION TECHNOLOGY*, 2013.
95. BONVOISIN, J; THIEDE, S; BRISSAUD, D; HERRMANN, C. An implemented framework to estimate manufacturing-related energy consumption in product design, *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING*, 2013.
96. GIORLEO, L; CERETTI, E; GIARDINI, C. Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES*, 2013.
97. CHUNG, Y; PAIK, C; YOON, S; BANG, J. Bottom-up approach for energy consumption and CO<sub>2</sub>E emissions of the korean automobile manufacturing, *ICIC EXPRESS LETTERS*, 2013.
98. PAIK, C; CHUNG, Y; YOON, S; BANG, J; LEE, J. Energy engineering approach for energy consumption and CO<sub>2</sub>E emissions: Case study of the Korean glass industry, *ICIC EXPRESS LETTERS*, 2013.
99. GONZÁLEZ-RAMÍREZ, J.E; LEDUCQ, D; ARELLANO, M; ALVAREZ, G. Energy consumption optimization of a continuous ice cream process, *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 2013.
100. HOLMBERG, K; SIILASTO, R; LAITINEN, T; ANDERSSON, P; JÄSBERG, A. Global energy consumption due to friction in paper machines, *TRIBOLOGY INTERNATIONAL*, 2013.
101. SEOW, Y; RAHIMIFARD, S; WOOLLEY, E. Simulation of energy consumption in the manufacture of a product, *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING*, 2013.
102. PELLICCIARI, M; BERSELLI, G; LEALI, F; VERGNANO, A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots, *MECHATRONICS*, 2013.
103. PORZIO, G.F; FORNAI, B; AMATO, A; MATARESE, N; VANNUCCI, M; CHIAPPELLI, L; COLLA, V. Reducing the energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of energy intensive industries through decision support systems - An example of application to the steel industry, *APPLIED ENERGY*, 2013.
104. PU, T; BAI, J. Predictive model of energy consumption in beer production, *JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW*, 2013.
105. DENG, J; LI, K; HARKIN-JONES, E; PRICE, M; KARNACHI, N; FEI, M. Energy consumption analysis for a single screw extruder, *COMMUNICATIONS IN COMPUTER AND INFORMATION SCIENCE*, 2013.
106. RAJANIEMI, M; AHOKAS, J. A case study of energy consumption measurement system in broiler production, *AGRONOMY RESEARCH*, 2012.

107. DUNN, J.B; GAINES, L; SULLIVAN, J; WANG, M.Q. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries, ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2012.
108. XU, J.-H; FLEITER, T; EICHHAMMER, W; FAN, Y. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis, ENERGY POLICY, 2012.
109. BI, Z.M; WANG, L. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study, JOURNAL OF MANUFACTURING SYSTEMS, 2012.
110. QUINTEIRO, P; ARAÚJO, A; OLIVEIRA, B; DIAS, A.C; ARROJA, L. The carbon footprint and energy consumption of a commercially produced earthenware ceramic piece, JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY, 2012.
111. QUINTEIRO, P; ARAÚJO, A; DIAS, A.C; OLIVEIRA, B; ARROJA, L. Allocation of energy consumption and greenhouse gas emissions in the production of earthenware ceramic pieces, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.
112. JANOVSÁ, K; VILAMOVÁ, S; BESTA, P; SAMOLEJOVÁ, A; VOŽŇÁKOVÁ, I. Determination of complex energy consumption of metallurgical production on the base of mathematical modelling of interdisciplinary linkages [Utvrđivanje kompleksne potrošnje energije metalurške proizvodnje na temelju matematičkog modeliranja interdisciplinarne povezanosti], METALURGIJA, 2012.
113. INGARAO, G; AMBROGIO, G; GAGLIARDI, F; DI, LORENZO, R. A sustainability point of view on sheet metal forming operations: Material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.
114. ALVES, H.J; MELCHIADES, F.C; BOSCHI, A.O. Thermal energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in the fabrication of ceramic tiles in Brazil, CFI CERAMIC FORUM INTERNATIONAL, 2012.
115. HIBINO, H; SAKUMA, T; YAMAGUCHI, M. Evaluation system for energy consumption and productivity in manufacturing system simulation, INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMATION TECHNOLOGY, 2012.
116. BEHRENDT, T; ZEIN, A; MIN, S. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2012.
117. VERGNANO, A; THORSTENSSON, C; LENNARTSON, B; FALKMAN, P; PELLICCIARI, M; LEALI, F; BILLER, S. Modeling and optimization of energy consumption in cooperative multi-robot systems, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, 2012.
118. HE, Y; LIU, B; ZHANG, X; GAO, H; LIU, X. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012.
119. HE, Y; LIU, F; WU, T; ZHONG, F.-P; PENG, B. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, PART B: JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2012.
120. KRUZHANOV, V; ARNHOLD, V. Energy consumption in powder metallurgical manufacturing, POWDER METALLURGY, 2012.
121. YILDIRIM, M.B; MOUZON, G. Single-machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm, IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT, 2012.
122. ATMACA, A; KANOGLU, M. Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry, ENERGY, 2012.

123. ANSARI, N; SEIFI, A. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry, *ENERGY*, 2012.
124. SORGÜVEN, E; ÖZILGEN, M. Energy utilization, carbon dioxide emission, and exergy loss in flavored yogurt production process, *ENERGY*, 2012.
125. HONCZARENKO, J; BERLIŃSKI, A. Energy consumption modeling of processes in the automated manufacturing systems, *MANAGEMENT AND PRODUCTION ENGINEERING REVIEW*, 2012.
126. SEOW, Y; RAHIMIFARD, S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems, *CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2011.
127. WANG, J; LI, J; HUANG, N. Optimal vehicle batching and sequencing to reduce energy consumption and atmospheric emissions in automotive paint shops, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE MANUFACTURING*, 2011.
128. DIETMAIR, A; VERL, A; EBERSPAECHER, P. Model-based energy consumption optimisation in manufacturing system and machine control, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MANUFACTURING RESEARCH*, 2011.
129. KARA, S; LI, W. Unit process energy consumption models for material removal processes, *CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 2011.
130. PASQUALINO, J; MENESES, M; CASTELLS, F. The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal, *JOURNAL OF FOOD ENGINEERING*, 2011.
131. SANTOS, J.P; OLIVEIRA, M; ALMEIDA, F.G; PEREIRA, J.P; REIS, A. Improving the environmental performance of machine-tools: Influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 2011.
132. SCHMITZ, A; KAMIŃSKI, J; MARIA, SCALET, B; SORIA, A. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the European glass industry, *ENERGY POLICY*, 2011.
133. KARAKAYA, A; ÖZILGEN, M. Energy utilization and carbon dioxide emission in the fresh, paste, whole-peeled, diced, and juiced tomato production processes, *ENERGY*, 2011.
134. ZAZYAN, A.S; TERLETSKII, S.V. Reducing the energy consumption in steel smelting in large high-power arc furnaces, *STEEL IN TRANSLATION*, 2010.
135. MONFORT, E; MEZQUITA, A; GRANEL, R; VAQUER, E; ESCRIG, A; MIRALLES, A; ZAERA, V. Analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in ceramic tile manufacture [Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas], *BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPANOLA DE CERAMICA Y VIDRIO*, 2010.
136. SUN, W.-Q; CAI, J.-J; DU, T; ZHANG, D.-W. Specific energy consumption analysis model and its application in typical steel manufacturing process, *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL*, 2010.
137. YU, J; WILLIAMS, E; JU, M. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China, *ENERGY POLICY*, 2010.
138. HE, Y; LIU, F. Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into the production operation of machining processes, *CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING (ENGLISH EDITION)*, 2010.
139. BODYAEV, Y.A; ZHURAVLEV, Y.P; KOPTSEV, L.A; PROKHOROV, S.V; NOVITSKII, I.D. Optimal energy balance and operational parameters of arc furnaces, *STEEL IN TRANSLATION*, 2010.

- 140.KOÇ, E; ÇINÇIK, E. Analysis of energy consumption in woven fabric production, FIBRES AND TEXTILES IN EASTERN EUROPE, 2010.
- 141.ASSIS, P.S; FANG, J; MANKHAND, T.R; DE, ASSIS, C.F.C; SALIERNO, G.F. Energy consumption in smelting reduction (SR) processes [Consumo de energia em processo de redução direta (SR)], REVISTA ESCOLA DE MINAS, 2010.
- 142.DU, J.D; HAN, W.J; PENG, Y.H; GU, C.C. Potential for reducing GHG emissions and energy consumption from implementing the aluminum intensive vehicle fleet in China, ENERGY, 2010.
- 143.PALAMUTCU, S. Electric energy consumption in the cotton textile processing stages, ENERGY, 2010.
- 144.GUO, Z.C; FU, Z.X. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China, ENERGY, 2010.
- 145.MEECH, D; LAWLOR, P. Aluminium rolling: Improving production and quality with minimum energy consumption, MATERIALS TECHNOLOGY, 2009.
- 146.PARK, C.-W; KWON, K.-S; KIM, W.-B; MIN, B.-K; PARK, S.-J; SUNG, I.-H; YOON, Y.S; LEE, K.-S; LEE, O.-H; SEOK, J. Energy consumption reduction technology in manufacturing - A selective review of policies, standards, and research, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, 2009.
- 147.KOCABAS, A.M; YUKSELER, H; DILEK, F.B; YETIS, U. Adoption of European Union's IPPC Directive to a textile mill: Analysis of water and energy consumption, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 2009.
- 148.DIETMAIR, A; VERL, A. A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENGINEERING, 2009.
- 149.FENG, C; MA, X.Q. The energy consumption and environmental impacts of a color TV set in China, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2009.
- 150.MOUZON, G; YILDIRIM, M.B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENGINEERING, 2008.
- 151.KHANNA, V; BAKSHI, B.R; LEE, L.J. Carbon nanofiber production: Life cycle energy consumption and environmental impact, JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, 2008.
- 152.LAU, H.C.W; CHENG, E.N.M; LEE, C.K.M; HO, G.T.S. A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system, EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, 2008.
- 153.DANERYD, A; OLSSON, M.G; LINDKVIST, R. Energy efficient rolling on-line minimization of energy consumption in the hot rolling of long products, NORDIC STEEL AND MINING REVIEW, 2007.
- 154.MOUZON, G; YILDIRIM, M.B; TWOMEY, J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH, 2007.
- 155.YU, Q.-B; LU, Z.-W; CAI, J.-J. Calculating Method for Influence of Material Flow on Energy Consumption in Steel Manufacturing Process, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 2007.
- 156.ZHANG, B.J; HUA, B. Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization, JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2007.

## APÊNDICE B – PRINCIPAIS CORRENTES DE AUTORES DAS AMOSTRAS

### *Web of Science*

Tabela 7 – As três correntes de autores cocitados na amostra da *Web of Science*

Autores e citações da primeira corrente		Autores e citações da segunda corrente		Autores e citações da terceira corrente	
AVRAM, O. I.	16	BALOGUN, V. A.	21	ANG, B. W.	20
DAHMUS, J. B.	17	DUFLOU, J. R.	13	HASANBEIGI, A.	15
DIAZ, N.	23	GUTOWSKI, T. G.	13	HOLMBERG, K.	13
DIETMAIR, A.	24	JIA, S.	15	IEA	12
DRAGANESCU, F.	17	KARA, S.	20	LIU, F.	24
FANG, K.	12	KELLENS, K.	11		
GUTOWSKI, T.	30	LI, L.	15		
HE, Y.	26	LI, W.	30		
HERMANN, C.	14	LV, J. X.	21		
HU, S. H.	15	WANG, Q. L.	15		
MORI, M.	21	YOON, H. S.	10		
MOUZON, G.	19				
PUSAVEC, F.	12				
RAJEMI, M. F.	19				
SEOW, Y.	12				

### *Scopus*

Tabela 8 – As três correntes de autores cocitados na amostra da *Scopus*

Autores e citações da primeira corrente		Autores e citações da segunda corrente		Autores e citações da terceira corrente	
DAHMUS, J.	45	DAHMUS, J. B.	27	ARAMCHAROEN, A.	28
DIAZ, N.	30	DIETMAIR, A.	38	FUJISHIMA, M.	27
DORNFELD, D.	69	HE, Y.	52	MATIVENGA, P. T.	61
DUFLOU, J. R.	40	JIA, S.	39	MORI, M.	29
GUTOWSKI, T.	58	LI, L.	36	ODA, Y.	28
GUTOWSKI, T. G.	35	LIU, F.	107	RAJEMI, M. F.	30
HERMANN, C.	57	MOUZON, G.	29		
KARA, S.	97	SUTHERLAND, J. W.	45		
KELLENS, K.	35	TANG, R.	30		
LI, W.	69	VERL, A.	36		
SEOW, Y.	30	YILDIRIM, Mx. B.	35		
THIEDE, S.	30	ZEIN, A.	28		
THIRIEZ, A.	44				