

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS
PARA BENEFICIAMENTO DE ALGODÃO**

**Tadeu Tomio Sudo
Engenheiro Mecânico**

2019

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS
PARA BENEFICIAMENTO DE ALGODÃO**

Tadeu Tomio Sudo

Orientador: Prof. Dr. Afonso Lopes

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2019

S943e Sudo, Tadeu Tomio
Energia incorporada e emissão de gases de efeito estufa na
fabricação de equipamentos para beneficiamento de algodão / Tadeu
Tomio Sudo. -- Jaboticabal, 2019
77 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Afonso Lopes

1. Aço-carbono. 2. Ecodesign. 3. Energia elétrica. 4. Tecnologia
limpa. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA BENEFICIAMENTO DE ALGODÃO

AUTOR: TADEU TOMIO SUDO

ORIENTADOR: AFONSO LOPES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AFONSO LOPES
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. DANIEL JUNIOR DE ANDRADE
Departamento de Fitossanidade / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. LEOMAR PAULO DE LIMA
Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM / Campus Uberlândia/MG

Prof. Dr. EVALDO FERREZIN
FATEC / Sertãozinho/SP

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO ALVES DE OLIVEIRA
Instituto Federal do Triângulo Mineiro-IFTM / Campus Uberlândia/MG

Jaboticabal, 18 de outubro de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Tadeu Tomio Sudo, filho de Yutaka Sudo e Yoko Fukuda Sudo, natural de Ribeirão Preto-SP, nasceu em 16 de maio de 1970. Em janeiro de 1993, concluiu o curso de Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual de Campinas. Durante a vida acadêmica, participou de duas iniciações científicas. Em maio de 2001, obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Desde 2012, elabora e revisa os itens do Banco Nacional de Itens (BNI), do Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE). Em novembro de 2013, obteve o título de Especialista em Gestão Pública pela Universidade Católica Dom Bosco, de Campo Grande - MS. Em março de 2016, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo). Em 2019, concluiu o curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) pela UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

"A poluição, a ganância e a estupidez são as maiores ameaças ao planeta."

Stephen Hawking

À minha esposa, aos meus filhos, aos meus pais e às minhas irmãs.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Grace, que durante o doutorado me apoiou, incentivando e acreditando em meu sucesso.

À minha filha Yumi, pela compreensão em alguns momentos de ausência para a conclusão do doutorado.

Ao meu filho Yuki, pela compreensão em alguns momentos de ausência para a conclusão do doutorado.

Ao professor Dr. Afonso Lopes, do Departamento de Engenharia Rural, da FCAV/UNESP, pela excelente orientação, amizade, companheirismo, compreensão e confiança durante a elaboração deste trabalho.

Ao professor Dr. José Marques Júnior, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Ao engenheiro mecânico Luiz Carlos Rodrigues (Sr. Busa), proprietário da empresa BUSA Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda., por permitir a obtenção de dados para a realização deste trabalho, sem o qual ele não seria viável.

Aos funcionários da empresa BUSA, pelo apoio e dedicação para o auxílio na obtenção das informações para este trabalho.

Ao aluno Antônio Alves Pinto, pela cooperação e amizade.

À Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal - SP, em especial ao servidor do Departamento de Engenharia Rural, o Secretário Davi Aparecido Trevizolli, que sempre esteve disposto a contribuir para a melhoria dos trabalhos realizados.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, pela colaboração.

Ao Laboratório de Biocombustível e Ensaio de Máquinas - BIOEM, pertencente ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia - IPBEN, FCAV/UNESP/Jaboticabal – SP, pelo apoio e suporte técnico.

À equipe da Seção Técnica de Pós-Graduação.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por acreditar em meu trabalho.

Ao professor Vítório Barato Neto, pela revisão ortográfica e gramatical deste trabalho.

A todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Definição de Energia.....	4
2.2 Evolução da Geração e Consumo de Energia.....	5
2.3 Fontes de Energia	7
2.4 Energia Incorporada	8
2.5 Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	10
2.6 Mudanças Climáticas e o Impacto do Setor Industrial	17
2.7 Processos de Fabricação	20
2.8 Produção Mais Limpa (P+L)	23
2.9 Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis (Ecodesign) e Green Lean.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

ENERGIA INCORPORADA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA BENEFICIAMENTO DE ALGODÃO

RESUMO – Na concepção do projeto e na fabricação de equipamentos, deve-se preocupar com a energia incorporada e com a quantidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE), de modo a atender às exigências ambientais, cada vez mais requeridas por organismos internacionais. Este trabalho teve como objetivo calcular a energia incorporada (MJ) e a emissão de GEE (kg CO₂e) na fabricação de equipamentos para beneficiamento de algodão, considerando a matéria-prima, a hora trabalhada e a energia elétrica consumida. O trabalho foi realizado na análise de três equipamentos de uma usina de beneficiamento de algodão. Os referidos equipamentos foram fabricados com tecnologia nacional por uma empresa localizada no interior do Estado de São Paulo. O primeiro equipamento, alimentador extrator automático, teve emissão de 6,57 CO₂e kg⁻¹ e energia incorporada de, 102,54 MJ kg⁻¹; o segundo equipamento, descaroador, teve emissão de 6,82 CO₂e kg⁻¹ e energia incorporada de 107,64 MJ kg⁻¹; e o terceiro equipamento, prensa hidráulica, teve emissão de 5,05 CO₂e kg⁻¹ e energia incorporada de 78,73 MJ kg⁻¹. Verifica-se a relevância dos materiais metálicos, principalmente do aço-carbono e a importância da energia elétrica consumida no cálculo de energia incorporada. O tempo homem/hora não foi relevante nos resultados de emissão de CO₂e kg⁻¹ e energia incorporada.

Palavras-chave: aço-carbono, ecodesign, energia elétrica, tecnologia limpa.

EMBODIED ENERGY AND GREENHOUSE GASES EMISSIONS IN THE MANUFACTURE OF COTTON BENEFIT EQUIPMENT

ABSTRACT – In conception of design and manufacturing equipment it must be concerned with the embodied energy and greenhouse gas emissions (GHG), in order to meet the environmental requirements, which are increasingly required by international organizations. This paper aimed to calculate the embodied energy (MJ) and the emission of GHG (kg CO_{2e}) in the manufacture of equipment for cotton processing, considering the raw material, the hour worked and the consumption of electric energy. The study analyzed three equipments of a plant of cotton benefit. These equipments were manufactured with national technology by a company located in the interior of the Brazilian state of São Paulo. The first equipment, automatic extractor feeder, had emission of 6.57 CO_{2e} kg⁻¹ and embodied energy of 102.54 MJ kg⁻¹; the second equipment, ginning machine; had emission of 6.82 CO_{2e} kg⁻¹ and embodied energy of 107.64 MJ kg⁻¹, and the third equipment, hydraulic press; had emission of 5.05 CO_{2e} kg⁻¹ and embodied energy of 78.73 MJ kg⁻¹. Then was verified the relevance of metallic materials, mainly carbon steel and the importance of consumption of electric energy in the calculation of embodied energy. The man/hour time was not relevant in the results of CO_{2e} kg⁻¹ emission and embodied energy.

Keywords: carbon steel, ecodesign, electric energy, clean technology.

LISTA DE ABREVIATURAS

“	Polegada (medida linear)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
cal	Caloria
CCl ₂ F ₂	CFC-12
CER	Certificados de Emissões Reduzidas
CF ₄	Perfluormetano
CH ₄	Metano
CHClF ₂	HCFC-22
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
cv	Cavalo Vapor (potência)
FAO	Food and Agriculture Organization
GEE	Gases de efeito estufa
GHG	Greenhouse Gas
Gt	Bilhões de toneladas
GWP	Global Warming Potential
ha	hectare
HCs	Hidrocarbonetos
Hg	Mercúrio
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
kgf	Quilograma força
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MJ	Mega Joule
MME	Ministério de Minas e Energia

MP	Material particulado
N ₂ O	Óxido nitroso
NO	Óxido Nítrico
NO ₂	Dióxido de Azoto ou Dióxido de Nitrogênio
O ₃	Ozônio Troposférico
°C	Grau Celsius
ONU	Organização das Nações Unidas
P+L	Produção mais Limpa
Pb	Chumbo
Ppbv	Parte por bilhão em volume
Ppm	Partes por milhão
RCE	Redução Certificada de Emissão
rpm	Rotações por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMED	Single Minute Exchange of Die
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO ₄ ⁻²	Sulfato
STP	Sistema Toyota de Produção
tCe	Toneladas de carbono equivalente
tCO ₂ e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
TPM	Total Productive Maintenance
UNEP	United Nations Environmental Program
VSM	Value Stream Mapping

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Necessidades energéticas para várias atividades.....	7
Tabela 2. Consumo final energético no Brasil, em 2018, por setor (MME, 2019).	9
Tabela 3. Principais gases de efeito estufa (GEE) (Goldemberg e Lucon, 2012).	13
Tabela 4. Possíveis resultados tangíveis e intangíveis da implementação da P+L (Lemos, 1998).	24
Tabela 5. Componentes do equipamento E1.	33
Tabela 6. Componentes do equipamento E2.	36
Tabela 7. Componentes do equipamento E3.	41
Tabela 8. Índices de energia incorporada por insumo.....	44
Tabela 9. Comparativo dos índices de energia incorporada entre os metais, como referência o alumínio.	44
Tabela 10. Fator de emissão CO ₂ e por insumo.	45
Tabela 11. Comparativo dos fatores de emissão de CO ₂ e entre os metais, como referência o alumínio.	46
Tabela 12. Informações da massa (kg) por tipo de material dos equipamentos E1, E2 e E3.....	47
Tabela 13. Porcentagem de cada insumo na composição do equipamento.	48
Tabela 14. Porcentagem de material ferroso e não ferroso na composição do equipamento.....	49
Tabela 15. Descrição do formato do insumo (kg) por tipo de material.	50
Tabela 16. Descrição do formato do insumo por tipo de material (%).	51
Tabela 17. Valores de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E1 (tipo de material).	54
Tabela 18. Porcentagem de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E1 (tipo de material). ..	54
Tabela 19. Valores de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E2 (tipo de material).	55
Tabela 20. Porcentagem de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E2 (tipo de material). ..	55
Tabela 21. Valores de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E3 (tipo de material).	56
Tabela 22. Porcentagem de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E3 (tipo de material). ..	56
Tabela 23. Tempo de cada processo de fabricação.....	58
Tabela 24. Proporção do tempo de cada processo de fabricação.	58

Tabela 25. Total de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E1.	59
Tabela 26. Total de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E2.	61
Tabela 27. Total de kg CO ₂ e e MJ do equipamento E3.	62
Tabela 28. Comparativo da proporção de kg CO ₂ e e MJ dos equipamentos.....	64
Tabela 29. Importância dos metais ferrosos e da energia elétrica na proporção de kg CO ₂ e e MJ dos equipamentos.	65
Tabela 30. Valores de emissão de CO ₂ e e energia incorporada dos três equipamentos.	65
Tabela 31. Valores de CO ₂ e kg ⁻¹ e MJ kg ⁻¹ dos três equipamentos.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Média global de concentrações de GEE (IPCC, 2014).	12
Figura 2. Emissões antropogênicas globais de CO ₂ (IPCC, 2014).	17
Figura 3. Representação esquemática dos processos de fabricação dos materiais metálicos (Bresciani Filho et al., 1986).	21
Figura 4. Distribuição de temperatura na ponta da ferramenta de metal duro (Diniz et al., 1999).	22
Figura 5. Alimentador Extrator - grelha quadrada (vista frontal).	30
Figura 6. Alimentador Extrator - grelha quadrada (vista lateral).	31
Figura 7. Descarçador com 200 serras, com catador de piolho (vista frontal).	34
Figura 8. Descarçador com 200 serras, com catador de piolho (vista lateral).	34
Figura 9. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (isométrico).	37
Figura 10. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (vista frontal).	38
Figura 11. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (vista lateral).	39
Figura 12. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E1.	52
Figura 13. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E2.	52
Figura 14. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E3.	53
Figura 15. Total % do fator de emissão (kg CO ₂ e) do equipamento E1.	60
Figura 16. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E1.	60
Figura 17. Total % do fator de emissão (kg CO ₂ e) do equipamento E2.	61
Figura 18. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E2.	62
Figura 19. Total % do fator de emissão (kg CO ₂ e) do equipamento E3.	63
Figura 20. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E3.	63

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial para fabricação de equipamentos agrícolas apresenta diversas dimensões, tais como: econômica, social e ambiental. Entretanto, existe amplo consenso em condição global em que ocorre o desequilíbrio dessas dimensões, o que tem alcançado escala que torna onerosa a continuidade da tecnologia industrial sem mudanças reais no processo produtivo (Reficco et al., 2018). De acordo com Hart e Milstein (1999), a sustentabilidade global requer a “destruição criativa das indústrias”.

Devido ao crescimento econômico, ocorre o aumento populacional e surgem grandes desafios, evidenciando-se a criação de novos postos de trabalho, capacitação e educação, redução das desigualdades, expansão da infraestrutura e dos serviços, aumento na eficiência de extração de recursos naturais e controle da poluição (Goldemberg e Lucon, 2012). Têm-se presenciado mudanças consideráveis no meio ambiente, causadas pela ação humana, mudanças essas denominadas antropogênicas (Beardsworth, 2018).

Com o crescimento da população mundial, eleva-se o consumo de energia per cápita, aumenta-se a queima de combustíveis fósseis, necessitando de maiores fontes de energia e propiciando elevação do aquecimento global. Em princípio, regiões mais desenvolvidas consomem mais eletricidade por habitante (Goldemberg e Lucon, 2012).

De acordo com Pedroso (2015), a demanda por recursos energéticos tem sido uma das principais causas do desequilíbrio ambiental mundial. E segundo Spoto e Paulsen (2014), o acúmulo de lixo e a modificação de ecossistemas propiciam este desequilíbrio ambiental.

Em 1997, criou-se o Protocolo de Kyoto com o objetivo de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa e o conseqüente aquecimento global, mas de acordo com Sandler (2017), em nível global, a eficácia do Protocolo de Montreal (1989) sobre o controle das substâncias que destroem a camada de ozônio é contrastada com a ineficácia do Protocolo de Kyoto sobre a redução dos gases de efeito estufa.

O desenvolvimento do agronegócio é relevante para o processo de desenvolvimento econômico brasileiro e, portanto, é importante para o progresso das políticas econômicas (Kureski e Moreita, 2016).

No setor agrícola e em muitos outros setores, ocorre aumento da competição global como consequência da produção em massa, do aumento da tecnologia padronizada e das inovações organizacionais e gerenciais (Barth e Melin, 2018).

Tem sido realizada a análise de energia incorporada em máquinas agrícolas, porém com dados de indicadores da década de 1960 (Mantoam et al., 2016), dados que podem estar ultrapassados, principalmente por causa da alteração da tecnologia.

Devido à importância da produção agrícola na economia, a falta de índices energéticos atualizados, a inexistência de índices de emissões para máquinas agrícolas e ainda pelo fato de que as indústrias de máquinas agrícolas planejam projetar produtos cada vez mais sustentáveis, justifica-se determinar novos indicadores de energia incorporada e emissões dos gases de efeito estufa (GEE) das máquinas agrícolas que tenham maior abrangência no cenário agrícola mundial.

Por causa da produção em massa, na concepção do projeto e na fabricação de equipamentos, deve-se preocupar com a energia incorporada e com a quantidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE), de modo a atender às exigências ambientais, cada vez mais requeridas por organismos internacionais.

É inevitável a preocupação com o meio ambiente, e devido ao aumento do consumismo e da concorrência globalizada, a maioria dos produtos tem ciclo de vida “curto” ou obsolescência planejada (Rivera e Lallmahomed, 2016), isto é, com data para ser retirada do mercado. O destino do descarte dos produtos após o consumo, denominado como logística reversa pós-consumo, deve ser de responsabilidade do fabricante (Cline et al., 2015), mas não ocorre na prática, e não existem mecanismos para controlar o descarte final destes produtos. A inovação é o grande desafio para o planejamento estratégico das empresas.

No desenvolvimento do projeto comercializável, alguns critérios devem ser considerados, relativos à questão econômica, ambiental e social. Com relação à

questão econômica, devem-se analisar o projeto do componente, os materiais empregados e as técnicas de fabricação (Callister e Rethwisch, 2013).

As empresas devem projetar produtos e serviços em curto período de tempo, com foco no consumidor, na sustentabilidade e utilizando menos recursos financeiros, humanos e materiais (Rivera e Lallmahomed, 2016), com o objetivo de ampliar a vantagem competitiva e de projetar conforme os fundamentos do ecodesign.

O transporte também tem influência na seleção, na aquisição de materiais e na prestação de serviços, devido as distâncias continentais do Brasil, podendo inviabilizar a seleção de alguns materiais em relação à sustentabilidade energético-ambiental.

Verifica-se a importância de ações de mitigação das emissões de GEE e consumo de energia, ações necessárias para a sustentabilidade ambiental.

O objetivo deste trabalho foi calcular a energia incorporada e a emissão de GEE na fabricação de três equipamentos de uma usina de beneficiamento do algodão, considerando insumos diretos e indiretos. Considera-se insumo como todo elemento necessário no processo de produção. Com estes dados analisam-se a relevância da matéria-prima utilizada nos componentes e a influência dos processos de fabricação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definição de Energia

Isaac Newton (1642-1727) definiu força como sendo qualquer agente capaz de produzir o movimento dos corpos, estabelecendo-a como o produto entre a massa e a aceleração do corpo (Goldemberg e Lucon, 2012).

De acordo com Halliday et al. (2018), força é a causa da aceleração dos objetos, alterando a velocidade. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de força é o Newton (N), sendo a quantidade que comunica ao corpo de massa de 1kg uma aceleração de 1 metro por segundo, a cada segundo.

Na natureza, existem três tipos de forças consideradas fundamentais (Goldemberg e Lucon, 2012):

- a) Forças gravitacionais que existem entre os corpos, devido ao fato de estes corpos possuírem massa;
- b) Forças eletromagnéticas (elétricas e magnéticas), devido à existência da carga elétrica; e
- c) Forças nucleares, que existem entre as partículas constituintes do núcleo dos átomos (prótons e nêutrons).

No planeta Terra, todos os objetos são atraídos em direção ao centro, e, portanto, para movimentar os objetos, esta atração precisa ser superada, necessitando também que seja vencido o atrito (Goldemberg e Lucon, 2012).

As forças de atrito são inevitáveis na vida diária. Cerca de 20% do combustível consumido pelo automóvel é usado para compensar o atrito das peças do motor e da transmissão (Halliday et al., 2018).

Frequentemente, não é suficiente aplicar somente a força ao corpo para que ele entre em movimento, sendo necessário mantê-la enquanto se movimenta. Daí a necessidade de definir trabalho (energia), que é o produto da força pela distância percorrida (trabalho = força x deslocamento) (Goldemberg e Lucon, 2012). O trabalho é a integral da força pelo deslocamento do ponto.

Existem várias formas de energia: cinética, potencial, interna, magnética, elétrica, nuclear e química (Kroos e Potter, 2015). A unidade do trabalho e da energia mecânica é o Joule (J). Quando se trata de calor, utiliza-se a unidade caloria (1 cal igual a 4,1868 J). A energia mecânica é o somatório das variações da energia potencial ou da energia cinética.

O trabalho não pode ser armazenado e representa a transferência de energia entre o sistema e o entorno, podendo ser positiva, quando o sistema recebe mais energia do que perde; ou negativa, quando a relação é inversa (Halliday et al., 2018).

2.2 Evolução da Geração e Consumo de Energia

A questão ambiental é preocupante, pois com o crescimento da população mundial, eleva-se o consumo de energia per cápita e aumenta-se a queima de combustíveis fósseis, necessitando-se de maiores fontes de energia, propiciando aumento do aquecimento global (Goldemberg e Lucon, 2012).

O consumo de energia é a principal origem de grande parte dos impactos ambientais, tais como, poluição urbana do ar, chuva ácida e efeito estufa (Goldemberg e Lucon, 2012). Também, devido às baixas margens de lucro e ao aumento da competitividade, as empresas industriais estão buscando alternativas para reduzir os custos de energia e para melhorar a eficiência operacional (Cui e Zhou, 2018).

Uma das principais leis da natureza é o princípio da conservação da energia, Primeira Lei da Termodinâmica, estabelecendo que, durante uma interação, a energia pode mudar de forma, mas que a quantidade total permanece constante, não podendo ser criada ou destruída (Çengel e Boles, 2013; Moran, 2013).

Desde o domínio da produção do fogo, o homem necessitou de energia para satisfazer as necessidades primárias de alimentação e aquecimento, e a energia contribuiu para a evolução e o desenvolvimento da agricultura e da pecuária (Hémery et al., 2018).

Inventado antes do século X, o moinho de água substituiu a energia animal pela energia cinética da água; a utilização da máquina a vapor substituiu a energia

humana pela energia motriz, favorecendo a extração de carvão mineral, potencializando a produção de aço-carbono para a construção de novas máquinas (Macedônio e Picchioni, 1985).

Segundo Terciole (2002), o vento é considerado forma indireta de energia solar (radiação solar), gerado pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre, resultante da movimentação do ar quente que sobe no Equador e desloca-se para as regiões polares, em movimento regular, isto é, os ventos são efeitos permanentes da dinâmica do planeta. Os ventos possuem energia cinética, que pode ser aproveitada com o uso de aerogeradores, os quais têm a capacidade de converter esta energia cinética contida nos ventos em energia elétrica. A energia eólica será importante no futuro do fornecimento de eletricidade (Destouni e Frank, 2010).

Na ânsia por melhoria no processo produtivo, as indústrias buscam alternativas para reduzir os impactos ambientais, bem como para melhorar a eficiência operacional e para reduzir os custos energéticos (Cui e Zhou, 2018). No entanto, o planeta está em trajetória, que resulta na emissão consistente de gases, aumentando a temperatura média em mais de 3,5 °C a longo prazo. Sem novas políticas e mitigação, projeta-se efeito de maior intensidade, gerando aumento da temperatura de, no mínimo, 6 °C (IEA, 2011).

Há cerca de 30.000 a.C., no período paleolítico superior (antiga idade da pedra superior), vivendo em grupos nômades, desenvolviam-se apenas atividades de caça e de coleta de alimentos, e o homem desse período tinha consumo energético de 2.000 a 3.000 kcal por dia, sendo capaz de transformar em energia mecânica útil apenas 20% (500-600 kcal) (Farias e Sellitto, 2011).

A energia mínima necessária para um ser humano adulto permanecer vivo por um dia é da ordem de 1.000 kcal. Para um adulto engajado em atividades normais, é de aproximadamente 2.000 kcal por dia, e para trabalho manual pesado, cerca de 4.000 kcal por dia. As necessidades energéticas para várias atividades estão descritas na Tabela 1 (Goldemberg e Lucon, 2012).

Tabela 1. Necessidades energéticas para várias atividades.

Esforço	Exemplo	Gasto energético (kcal/hora)
	Permanecer relaxado	20
	Atividades leves	50-60
leve a moderado	Caminhar, tomar banho	125-240
	Trabalho leve (ex. carpintaria)	150-180
	Marchar	280
	Quebrar pedras	350
pesado	Remar, nadar, correr	400-700
	Esportes intensos	800-1.000

2.3 Fontes de Energia

Segundo Goldemberg e Lucon (2012), usualmente, as fontes de energia primária são classificadas como comerciais (quando são objeto de transações monetárias, tais como carvão, petróleo, gás natural) e não comerciais (obtidas de forma gratuita, por exemplo, luz solar).

O Ministério de Minas e Energia (MME) (2019) classifica as fontes de energia primária como não renováveis (petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio) e renováveis (hidráulica, lenha, produtos da cana, eólica e solar).

A fonte de energia primária é considerada renovável quando as condições naturais permitem a reposição em curto prazo (Goldemberg e Lucon, 2012):

- a) energia solar;
- b) energia maremotriz e das correntes marinhas;
- c) energia geotermal;
- d) energia potencial hidráulica;
- e) energia eólica;
- f) biomassa.

A energia primária é submetida a transformações, gerando a energia secundária, consumida pelo homem (Goldemberg e Lucon, 2012):

- a) eletricidade gerada pelas hidrelétricas (energia hidráulica), termelétricas (combustíveis fósseis, calor geotermal, biomassa ou fissão nuclear), usinas eólicas, painéis fotovoltaicos;
- b) derivados de petróleo (óleo diesel, óleo combustível, gasolina, querosene, gás liquefeito de petróleo);
- c) biomassa “moderna” (biogás de aterros e biocombustíveis);
- d) calor de processo e de aquecimento distrital (combustão em caldeiras).

Segundo Destouni e Frank (2010), as fontes de energia renováveis podem fornecer até 35% do suprimento global de energia e quase metade da produção de eletricidade até 2050. A participação da energia fóssil na oferta global de energia deverá reduzir-se dos atuais 80% para 53% até 2050.

A bioenergia aumentará em importância, e a principal opção de energia de biomassa deverá ser dos resíduos da silvicultura e da agricultura, juntamente com resíduos orgânicos. A eletricidade deve tornar-se a mais importante fonte de energia no futuro. Espera-se que a demanda da eletricidade aumente em cerca de 125% até o ano de 2050, enquanto a energia primária global aumenta em 21% (Destouni e Frank, 2010).

2.4 Energia Incorporada

A energia incorporada (“embodied energy”) nos materiais é definida como a energia necessária para extrair, produzir e transportar, e utiliza a unidade MJ kg^{-1} (Tavares et al., 2019). Royston et al. (2018) comentaram sobre a importância de políticas para a redução da demanda de energia, e afirmam que raramente são prioridades.

No Brasil, em 1959, ocorreu o início das atividades da indústria de tratores (Amato Neto, 1985), favorecendo a mecanização agrícola. No sistema agrícola, além do óleo diesel utilizado nas operações mecanizadas e da eletricidade utilizada por sistemas de irrigação ou secadores em unidades de

armazenamento, contabiliza-se também a energia incorporada em insumos como maquinário, fertilizantes, defensivos, sementes e demais insumos empregados no processo de produção, sendo adicionais à solar (Souza e Milanez, 1996). Fluck e Baird (1980) afirmaram que a análise energética é a análise objetiva das quantidades físicas, envolvidas no processo ou no sistema, podendo identificar e medir os fluxos de energia.

Segundo Balanço Energético Nacional (MME, 2019), os setores que mais consumiram energia foram o de serviços (39,8%) e o da indústria (33,5%); as habitações consumiram 10,4% da energia total disponibilizada no País. Conforme pode ser observado na Tabela 2, somente referente ao transporte, o setor de serviços representou 34,6%.

Tabela 2. Consumo final energético no Brasil, em 2018, por setor (MME, 2019).

Setor	Consumo 2018
Serviços	39,8%
Agropecuário	4,3%
Indústria	33,5%
Energético	11,9%
Residencial	10,4%
Consumo final energético	100,0%

Segundo IEA (2018), em 2016, as indústrias consumiram cerca de 41,6% do consumo mundial de energia elétrica. A energia incorporada total do material engloba basicamente as fases de:

- Energia de extração na forma bruta da natureza;
- Energia do processo de fabricação primária, por exemplo, fundição;
- Energia do processo de fabricação secundário para obter a forma desejada da peça, por exemplo, conformação plástica, usinagem, soldagem e/ou para obter as condições mecânicas de projeto, por exemplo, tratamento térmico;
- Energia no transporte.

De acordo com Silva et al. (2002), uma das maiores limitações para o desenvolvimento do cálculo de energia incorporada pela ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a falta de dados confiáveis e/ou consistentes. As principais razões são: sigilo de dados pelos proprietários, falta de critérios consolidados para a elaboração de relatórios, questões regulamentares, falta de atratividade para as organizações coletarem dados e, principalmente, o custo. No Brasil, há outro agravante: os bancos de dados devem ter características regionais, em função dos condicionantes geográficos, tecnológicos, econômicos e sociais.

No Brasil, para produzir carboidrato e proteína como fonte de energia, identificou-se a porcentagem de participação das máquinas agrícolas na demanda energética para as culturas: soja 5% (0,35 GJ ha⁻¹), amendoim 5% (0,48 GJ ha⁻¹), trigo 3% (0,46 GJ ha⁻¹), feijão 3% (0,55 GJ ha⁻¹) e milho 2% (0,29 GJ ha⁻¹) (Veiga et al., 2015).

2.5 Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)

A atmosfera terrestre é composta por inúmeros gases que ficam retidos por causa da força da gravidade e do campo magnético que envolve a Terra. Boustead e Hancock (1979) comentaram na década de 70 que os maiores e mais discutidos problemas globais eram a queima de combustíveis fósseis, proporcionando o aquecimento na atmosfera da Terra, e se o aumento da industrialização e da urbanização liberar mais calor para a atmosfera, a temperatura do planeta Terra aumentará.

Os inventários de emissões são importantes ferramentas para o planejamento energético-ambiental. O conhecimento de intensidades em emissões ao longo do tempo e as origens permitem melhor controle de poluição, podendo identificar setores, regiões e tipologias (industriais ou não industriais, com postos de combustíveis, queimadas, estabelecimentos comerciais, poluentes, vias de tráfego intenso, aeroportos) (Goldemberg e Lucon, 2012).

Segundo Yu (2004), os inventários de GEE refletem as três dimensões da sustentabilidade. Sendo o componente econômico motivado pelo mercado de

carbono; o social, dirigido para as comunidades locais; e o ecológico, devido ao reflorestamento ou à conservação florestal e à mitigação das emissões.

De acordo com Goldemberg e Lucon (2012), os principais poluentes do ar são:

- a) Dióxido de Enxofre (SO_2) - combustão de carvão e derivados de petróleo, processos industriais utilizando enxofre;
- b) Monóxido de Carbono (CO) - queima incompleta de combustíveis fósseis e de biomassa;
- c) Óxidos de Nitrogênio (NO e NO_2) - queima de combustíveis sob altas temperaturas, especialmente os que contêm nitrogênio na composição;
- d) Material particulado (MP) - queima incompleta de combustíveis fósseis e de biomassa, presença de enxofre no combustível formando sulfatos (SO_4^{-2});
- e) Hidrocarbonetos (HCs) - emissões evaporativas de combustíveis;
- f) Ozônio Troposférico (O_3) - poluente secundário, não emitido pelos processos, mas formado pela oxidação fotoquímica de NO_x e HCs na atmosfera;
- g) Metais pesados (chumbo Pb e mercúrio Hg) - queima de carvão e derivados de petróleo com aditivos.

A atmosfera terrestre é quase transparente à radiação solar incidente, e uma pequena fração dessa radiação é refletida de volta para o espaço, mas a maior parte atinge a superfície do planeta, principalmente sob a forma de luz visível, absorvida e reemitida como radiação térmica em todas as direções por raios infravermelhos.

A atmosfera contém gases que não são transparentes à radiação térmica, atuando como cobertor, aquecendo a Terra, como efeito estufa.

Os principais gases de efeito estufa (GEE) são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), CFC-12 (CCl_2F_2), HCFC-22 (CHClF_2), perfluormetano (CF_4) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (Hanaoka et al., 2014; IPCC, 2014). A Figura 1 mostra a média global das concentrações dos principais GEEs ao longo dos anos, e observa-se aumento significativo (IPCC, 2014). Dentre os principais gases de efeito estufa (GEE), o CO_2 é o gás produzido em maior quantidade, representando mais de metade do impacto atual no clima da Terra (National Research Council, 2011).

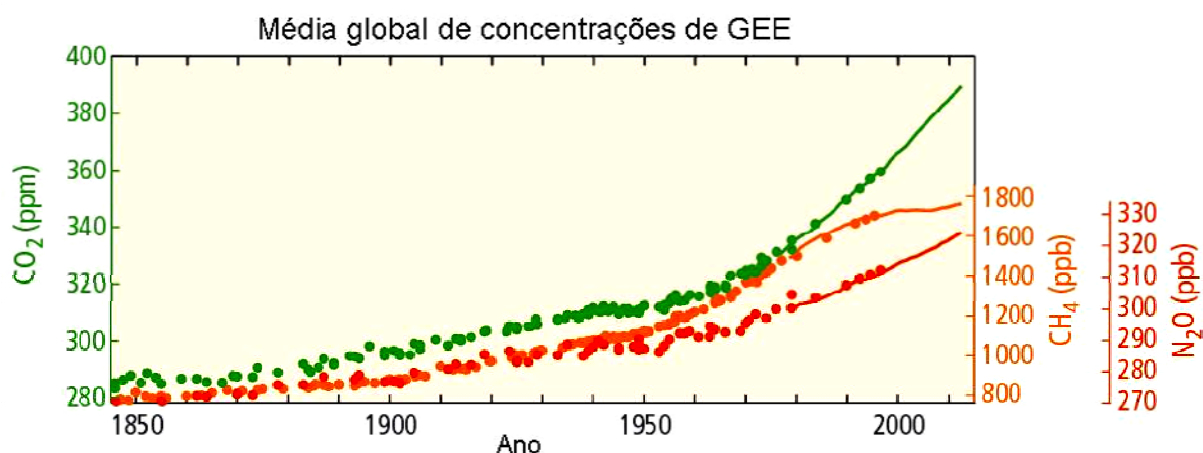


Figura 1. Média global de concentrações de GEE (IPCC, 2014).

A capacidade desses GEEs em contribuir para o aquecimento global é medida pelo indicador Potencial de Aquecimento Global (“Global Warming Potential” GWP), introduzido no Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014).

GWP é a medida que mostra quanto uma determinada massa do gás de efeito estufa é capaz de reter calor na atmosfera em comparação à mesma massa de gás equivalente de CO₂. O GWP depende do tempo de vida na atmosfera e das interações com os outros gases e com o vapor d’água. O valor do GWP é calculado para determinado período de tempo (como 20; 50 ou 100 anos) e considerando a capacidade de absorção de raios infravermelhos. Como referência para o cálculo, é utilizado o CO₂, sendo o GWP estabelecido como padrão (valor 1). Quanto maior o valor do GWP, maior o impacto sobre o aquecimento global. De acordo com a Tabela 3, pode ser observado que o GWP de outros gases é calculado com base no CO₂ (Goldemberg e Lucon, 2012).

Tabela 3. Principais gases de efeito estufa (GEE) (Goldemberg e Lucon, 2012).

GEE	GWP	Concentrações (ppbv)		Tempo de vida na atmosfera (anos)	Fontes antrópicas
		pré-industrial	em 2007		
CO ₂	1	278.000	383.000	variável	Combustíveis fósseis, desmatamento
CH ₄	21	700	1.770	12	Resíduos, gado
N ₂ O	310	270	311	120	Fertilizantes, processos industriais
CCl ₂ F ₂	6.200-7.100	0	0,503	102	Refrigeração, agentes expansores
CHClF ₂	1.300-1.400	0	0,105	12	Refrigeração
CF ₄	6.500	0	0,070	50.000	Produção de alumínio
SF ₆	23.900	0	0,032	3.200	Fluido dielétrico

O óxido nitroso (N₂O) é um gás inerte na troposfera, por esse motivo permanece na atmosfera por cerca de 120 anos até que se converta na estratosfera. Conforme Tabela 3, verifica-se que o N₂O tem potencial de aquecimento global aproximadamente 310 vezes superior ao do dióxido de carbono (Goldemberg e Lucon, 2012).

Normalmente, as informações sobre emissões são dadas em toneladas de carbono equivalente (tCe) ou toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) (Goldemberg e Lucon, 2012).

1 tCe = 12/44 tCO₂e, onde 12/44 é a relação da massa molecular

1 tCH₄ = GWP tCO₂e = 21 tCO₂e

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC “United Nations Framework Convention on Climate Change”) estabeleceu o período entre 2013 e 2020 como o segundo período de compromissos do Protocolo de Kyoto e definiu que, para os inventários submetidos no âmbito da Convenção-Quadro durante este período, devem-se adotar os valores de referência para GWP contidos no Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (“Fourth Assessment Report” ou AR4).

A atmosfera e os GEEs permitiram a vida na Terra, e estima-se que sem os GEEs a temperatura média na superfície da Terra seria 15 a 20 °C abaixo de zero. O aquecimento global é fenômeno natural e benéfico, pois ajuda no controle da temperatura média do planeta (Molion, 2008).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (“Food and Agriculture Organization” FAO) estima que as florestas do mundo estoquem 283 bilhões de toneladas (Gt) de carbono na biomassa, sem contar a matéria orgânica depositada nos solos (Goldemberg e Lucon, 2012).

Segundo a FAO (2014), a maior fonte de emissão de GEE na agricultura é a fermentação entérica, devido à produção de metano pelos animais durante a digestão e a expulsão por eructação. Em 2011, representou 39% das emissões totais de GEE do setor. As emissões provenientes da fermentação entérica aumentaram 11% entre 2001 e 2011. Conforme Kimming et al. (2015), existe consciência de que a produção agrícola afeta negativamente o ambiente global, por causa do consumo de energia e da emissão de GEE.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei n. 12.187, de 2009, oficializa o compromisso voluntário do Brasil perante a Organização das Nações Unidas (ONU) de diminuir as emissões de GEE, cuja meta é cortar entre 36,1% e 38,9% das emissões de GEE até 2020 (MMA, 2018), para a contribuição da proteção do sistema climático global por meio da harmonização do desenvolvimento sustentável, com o crescimento econômico e social.

A metodologia mais utilizada para quantificar as emissões de GEE é o GHG Protocol, compatível com as normas da “International Organization for

Standardization” (ISO) e com as metodologias de quantificação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) (GHG Protocol, 2018).

As empresas que publicam seus inventários de emissões de GEE podem identificar oportunidades para a redução de emissões e realizar projetos passíveis de obtenção de créditos comercializáveis no mercado de carbono (GHG Protocol, 2018).

O Protocolo de Kyoto criou o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que prevê a redução certificada das emissões. Conquistada essa certificação, quem promove a redução da emissão de gases poluentes tem direito a créditos de carbono e pode comercializá-los com os países que têm metas a cumprir. Cada tCO₂e reduzida ou removida da atmosfera corresponde a uma unidade emitida pelo Conselho Executivo do MDL, denominada de Redução Certificada de Emissão (RCE). Cada tCO₂e equivale a 1 crédito de carbono, podendo ser negociada no mercado mundial por meio de Certificados de Emissões Reduzidas (CER). No Brasil, a compra e a venda de créditos de carbono é por meio de leilões promovidos pela BM&FBOVESPA (Meio Ambiente, 2012).

Segundo estudo do Banco Mundial (2017), para cumprir os compromissos do Acordo do clima de Paris (manter o aquecimento global em 2 °C neste século), o preço da tonelada de carbono deveria estar entre US\$40 e US\$80 em 2020, e entre US\$50 e US\$100 em 2030, para estabelecer forte política para estimular as tecnologias limpas e as energias renováveis (Valor Econômico, 2017).

As fontes de emissão identificadas devem ser classificadas como diretas ou indiretas. Para isso, foram criados os conceitos dos escopos 1; 2 e 3 (GHG Protocol, 2018):

- a) Escopo 1 - emissões diretas são as emissões de GEE oriundas de fontes pertencentes ou controladas pela empresa.
- b) Escopo 2 - emissões indiretas são as emissões de GEE oriundas da compra de energia elétrica e térmica que é consumida pela empresa.
- c) Escopo 3 - (categoria de relato opcional) são as outras emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor. Mais especificamente, são as emissões provenientes da extração e da produção de matérias-primas, transporte de

funcionários, emissões relativas ao uso final dos produtos, viagens de funcionários, transporte de combustíveis adquiridos, etc.

As emissões do Escopo 1 devem ser subdivididas em cinco categorias (GHG Protocol, 2018):

- 1) Combustão estacionária para geração de eletricidade, vapor, calor ou energia com o uso de equipamento (caldeiras, fornos, queimadores, turbinas, aquecedores, incineradores, motores, fochos, etc.) em local fixo;
- 2) Combustão móvel para transportes em geral (frota operacional da empresa) e veículos fora de estrada, tais como os usados em construção, agricultura e florestas;
- 3) Emissões de processos físicos e químicos: emissões que não sejam de combustão, resultantes de processos físicos ou químicos, tais como as emissões de CO₂ da calcinação na fabricação de cimento, as emissões de CO₂ da quebra catalítica no processamento petroquímico, as emissões de PFC (perfluorcarbonos) da fundição do alumínio, etc;
- 4) Emissões fugitivas: liberações da produção, processamento, transmissão, armazenagem e uso de combustíveis e liberações não intencionais de substâncias que não passem por chaminés, drenos, tubos de escape ou outra abertura funcionalmente equivalente, tais como liberação de hexafluoreto de enxofre (SF₆) em equipamentos elétricos, vazamento de hidrofluorcarbonos (HFCs) durante o uso de equipamentos de refrigeração e ar-condicionado e vazamento de metano (CH₄) no transporte de gás natural;
- 5) Emissões agrícolas: fermentação entérica (CH₄); manejo de esterco (CH₄, N₂O); cultivo do arroz (CH₄); preparo do solo (CO₂, CH₄, N₂O); queima prescrita da vegetação nativa (CH₄, N₂O); queima dos resíduos agrícolas (CH₄, N₂O).

Segundo Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (2018), no Brasil, em 2015, as emissões per cápita superam 10,6 tCO₂eq/habitante e continuam superiores à média global de 7,3 tCO₂/hab.

2.6 Mudanças Climáticas e o Impacto do Setor Industrial

A concentração de CO₂ na atmosfera está aproximando-se de 450 ppm, aumentando a temperatura ao máximo de 2 °C, necessitando de ações urgentes (Forestry For a Low-Carbon Future, 2016; IPCC, 2014). Mas, de acordo com Singer (2003), não é consenso na comunidade científica de que o aquecimento da superfície da Terra seja causado exclusivamente pelo aumento da concentração de GEE.

Por causa desta preocupação, o Protocolo de Kyoto (1997), acordo internacional entre os países integrantes da Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu aos países desenvolvidos a meta de redução de 5,2% aos níveis de emissão de 1990. Aos países em desenvolvimento não se estabeleceu nenhuma meta de redução.

Na Figura 2, verifica-se o aumento significativo de emissões antropogênicas globais de CO₂, comparando Silvicultura e outros usos na terra, com queima de combustíveis fósseis, produção de cimento e queima de gás. Observa-se que, entre 1750 e 2011, as emissões para a atmosfera foram 2.040±310 GtCO₂ (IPCC, 2014).

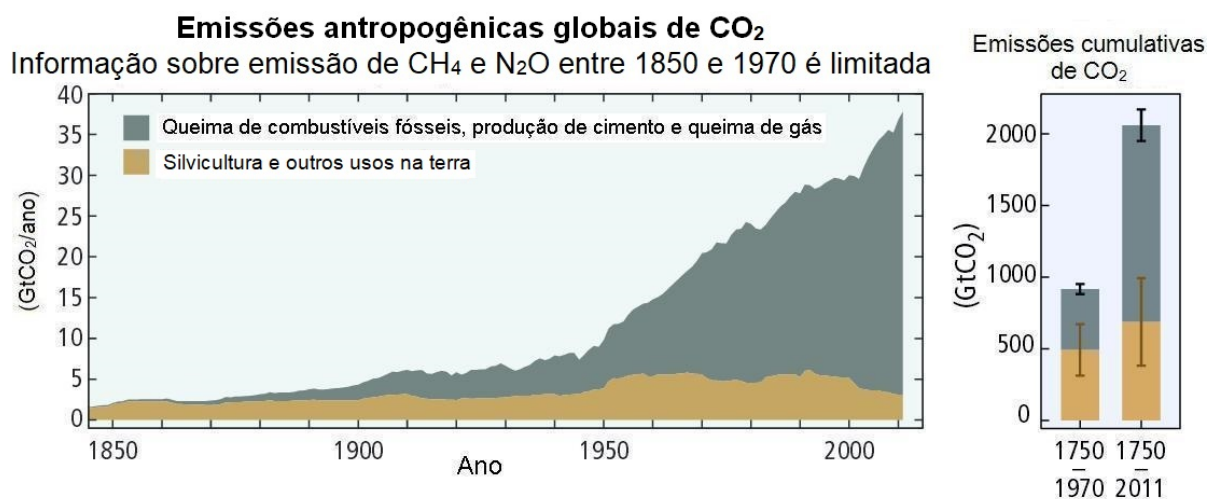


Figura 2. Emissões antropogênicas globais de CO₂ (IPCC, 2014).

Segundo IPCC (2014), o crescimento da economia e da população continua sendo o mais importante para o crescimento da emissão de CO₂ por meio da queima de combustível fóssil. Segundo Álvares Jr. e Linke (2000), o CO₂ é responsável por

97% das emissões totais de GEE provenientes de fontes móveis, admitindo incerteza de 5%, principalmente devido à operação do veículo.

As empresas dependem muito do transporte, desde transportes de produtos e de serviços, como no deslocamento de colaboradores. E devido à globalização, utilizam-se componentes de fornecedores de locais geográficos cada vez mais distantes. Os modais logísticos (rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo e dutoviário) estão muito eficientes, principalmente utilizando o transporte multimodal (Dias, 2012), mas totalmente dependentes de combustíveis fósseis.

Nos parques fabris, existem muita movimentação e manuseio de materiais, realizados por equipamentos movidos com combustível fóssil e eletricidade, tais como, paleteira (elétrica e manual), empilhadeira (diesel, gasolina, gás e elétrica), transportadores de roletes, pontes rolantes, guindastes, monovias e carrinhos transportadores (Gonçalves, 2010).

Segundo IEA (2009), a energia utilizada nos sistemas de transporte irá dobrar até 2050, e o transporte privado é o principal responsável pela emissão de dióxido de carbono. Segundo o Balanço Energético Nacional (MME, 2019), em 2018, o setor de transporte representou 34,6% do consumo energético nacional.

Em 2017, no Brasil, o consumo de óleo diesel no transporte rodoviário de cargas foi de 44,17 milhões de m³ (Transportes 2017, 2017), representando 84,27% do consumo nacional de óleo diesel (ANP, 2018). Em 2018, houve aumento de 1,79% no consumo de óleo diesel, refletindo o aumento da quilometragem rodada no transporte rodoviário de cargas (Transportes, 2018).

Com relação à matéria-prima, considerando o consumo de energia para a produção e grande utilização nas indústrias, deve-se atenção ao aço-carbono e ao ferro fundido, apesar do baixo custo do ferro comparado aos demais materiais metálicos.

O ferro fundido é obtido pela redução do minério de ferro nos altos fornos, ocorrendo a fusão do minério e a liberação do oxigênio, gerando o ferro-gusa. Os altos fornos consomem coque (carvão mineral) como combustível. O ferro-gusa transforma-se em aço-carbono no processo de aciaria; e após, pelo processo de laminação, o material líquido transforma-se em chapas, vergalhões e barras.

Segundo Bresciani Filho (1988), o aço-carbono é considerado como a mais importante categoria de materiais metálicos utilizada na construção de máquinas operatrizes, equipamentos, estruturas, veículos e componentes diversos de sistemas mecânicos. De acordo com Mott (2015), o aço-carbono é, provavelmente, o material mais amplamente utilizado para elementos de máquinas, devido às propriedades de alta resistência, rigidez elevada, durabilidade e relativa facilidade de fabricação.

O material ferro fundido tem a vantagem de custo baixo e facilidade de fabricação, mas tem baixa resistência à tração (Norton, 2013). São aplicações de ferro fundido cinzento: bases de máquinas, blocos de motores, rotores e tambores de freio (Norton, 2013).

A utilização de materiais reciclados para a produção de aço-carbono em fornos elétricos representa aproximadamente um terço da produção mundial e normalmente consome de 60% a 70% menos energia (De Beer et al., 1998). Os materiais ferro fundido e aço-carbono são 100% recicláveis.

Devido a esta importância, existe a norma ABNT NBR 16229:2013 - Sucata de ferro fundido e aço, elaborada pelo Comitê Brasileiro de Siderurgia (ABNT/CB-028), que classifica os diversos tipos de sucata em (ABNT, 2013):

a) Quanto à origem:

Industrial: sucata resultante de qualquer processamento industrial

Obsolescência: sucata resultante de todos os materiais considerados obsoletos e irrecuperáveis para o uso a que se destinavam originalmente;

b) Quanto às características físicas;

c) Quanto aos elementos de liga.

Segundo Leite (2009), no Brasil, em proporções estimadas, cerca de 70% da sucata é obtida por obsolescência dos produtos e 30% de sucata obtida de resíduos industriais. O Brasil consegue reciclar cerca de 70% da sucata disponível.

2.7 Processos de Fabricação

Nos processos de fabricação, geralmente, haverá mais de um método que poderá ser empregado para produzir determinado componente (Machado et al., 2015).

De acordo com Kalpakjian (1995), na seleção de processos de fabricação, devem ser considerados os fatores:

- a) Tipo do material, especificação do material e as propriedades;
- b) Propriedades finais desejadas;
- c) Tamanho, forma e complexidade do componente;
- d) Tolerâncias e acabamento superficial exigidos;
- e) Processo subsequente envolvido;
- f) Projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz;
- g) Sucata gerada e seu valor;
- h) Disponibilidade do equipamento e experiências operacionais;
- i) Tempo necessário para iniciar a produção;
- j) Número de partes requeridas e taxa de produção desejada;
- k) Custo total do processamento.

Segundo Ferraresi (1977), os processos de fabricação podem ser classificados em:

- a) Com remoção de cavaco: usinagem.
- b) Sem remoção de cavaco: fundição, soldagem, metalurgia do pó e conformação.

Cavaco é a porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular (Machado et al., 2015).

De acordo com Bresciani Filho et al. (1986), os processos de fabricação podem ser classificados em processos mecânicos e metalúrgicos, necessitando de esforços mecânicos e de temperatura elevada, respectivamente. A Figura 3 mostra a representação esquemática dos processos de fabricação dos materiais metálicos. Para o cálculo preciso de energia incorporada e emissão de CO₂e, devem-se

considerar os processos envolvidos para a obtenção dos insumos, porque envolvem muito tempo e energia consumida.

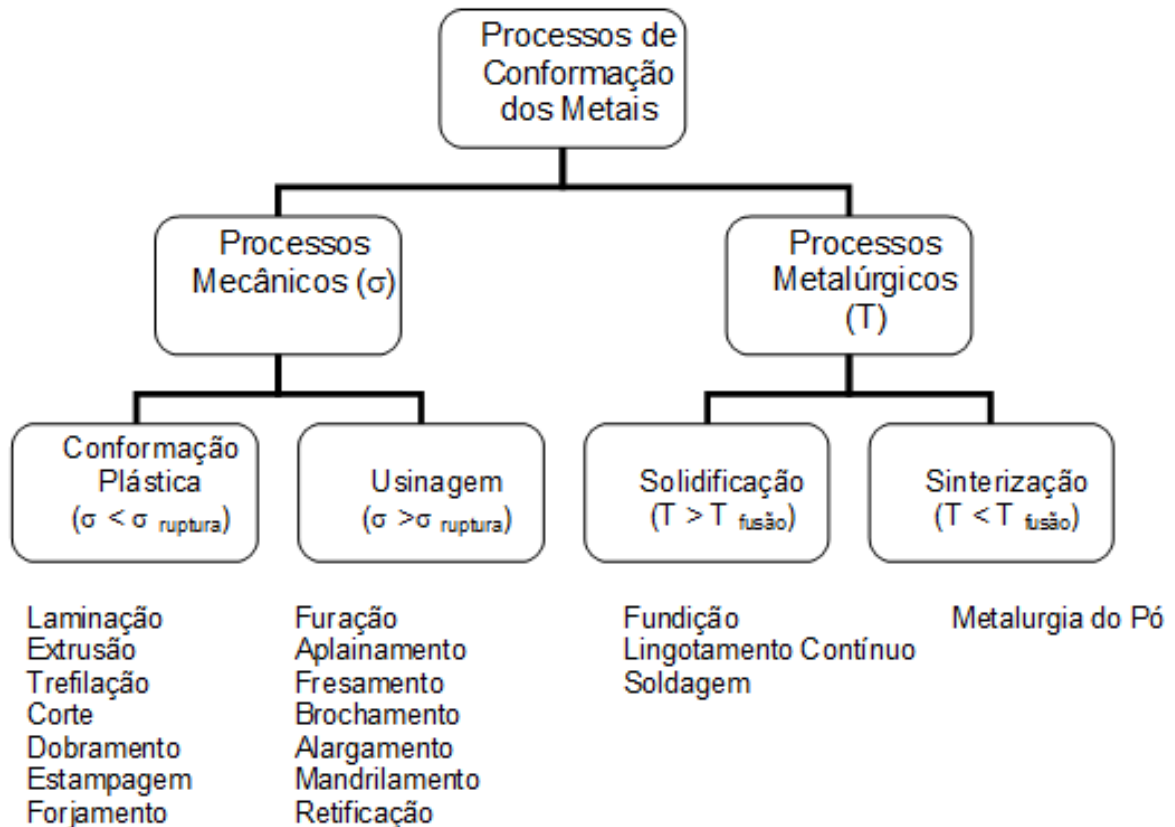


Figura 3. Representação esquemática dos processos de fabricação dos materiais metálicos (Bresciani Filho et al., 1986).

A usinagem é o processo de fabricação mais popular no mundo, transformando em cavacos em torno de 10% de toda produção de metais (Trent, 1991).

Experimentalmente, verificou-se que de 87 a 90% de todo o trabalho de usinagem transformam-se em calor (Ferraresi, 1977). Diniz et al. (1999) e Trent (1991) afirmam que praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica. A quantidade de calor produzida é dissipada por meio do cavaco, da peça, da ferramenta, do meio ambiente e do fluido de corte; estas porcentagens de calor dependem do tipo de usinagem, do material da peça e da ferramenta, das condições de usinagem e da forma da ferramenta

(Diniz et al., 1999; Ferraresi, 1977). A Figura 4 mostra a distribuição de temperatura na ponta da ferramenta de metal duro, e verifica-se que a temperatura chega 1.200°C.

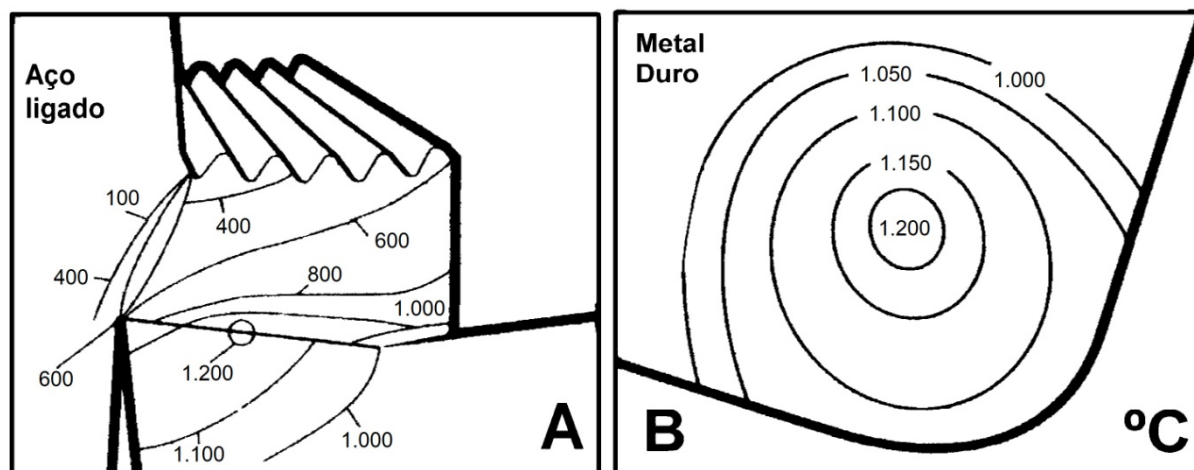


Figura 4. Distribuição de temperatura na ponta da ferramenta de metal duro (Diniz et al., 1999).

O dobramento de chapa metálica (conformação plástica) é uma das principais abordagens para se fabricar peças em três dimensões e é amplamente usado na produção em massa (Ablat e Qattani, 2018).

Segundo Parthiban et al. (2014), o corte a laser é o processo adequado para o corte de chapas metálicas. No processo de corte a laser, ocorre excessivo aquecimento da peça cortada (Sharma e Yadava, 2018). Na operação de corte a laser, a potência no laser é cerca de 10% da potência instalada na máquina, sendo 90% da potência instalada associada à perda por atrito e também convertida em energia térmica. E parte da energia do feixe de laser é transferida ao meio ambiente por convecção e por radiação. Existe o aquecimento da chapa, aumentando a taxa de transferência de calor ao meio ambiente.

O processo de soldagem é o principal processo para fixação permanente de materiais metálicos, e é considerado processo que envolve temperaturas elevadas, emitindo muito calor ao meio ambiente.

2.8 Produção Mais Limpa (P+L)

Existe tendência para mudança para manufatura sustentável de processos e produtos, influenciando as organizações para melhorar o desempenho e a eficiência ambiental (Caldera et al., 2017).

Os esforços industriais para reduzir os impactos ambientais dos produtos e dos processos estavam focados em duas áreas: desenvolvimento do processo de reciclagem, especialmente para metais e plásticos, e substituições de produtos químicos nos processos de manufatura, tornando-os processos denominados “processos limpos” (Oliveira e Alves, 2007).

O conceito de Produção mais Limpa foi criado pela UNEP (“United Nations Environmental Program”) em 1988. Segundo a UNEP, a Produção mais Limpa é a expressão consagrada para designar práticas preventivas, é a aplicação contínua de estratégia ambiental preventiva e integrada, aplicada a processos, produtos e serviços, minimizando a geração de resíduos e de poluição, bem como os riscos à saúde humana.

A Tabela 4 descreve alguns dos possíveis resultados, tangíveis e intangíveis, que se podem obter, implementando a P+L.

Tabela 4. Possíveis resultados tangíveis e intangíveis da implementação da P+L (Lemos, 1998).

Resultados Tangíveis	Resultados Intangíveis
1. Geração de inovações tecnológicas de processo, produto e gerencial.	1. Desenvolvimento econômico mais sustentado.
2. Benefícios advindos de vantagens comerciais (concessão de financiamentos, obtenção de seguros com taxas mais atrativas, facilidade para tornar-se fornecedor de grandes empresas).	2. Melhoria da qualidade ambiental do produto.
3. Aumento da competitividade (por meio da redução de custos ou da melhoria da eficiência).	3. Melhoria da imagem pública da empresa.
4. Redução de custos com matérias-primas, insumos e energia.	4. Aumento da eficiência ecológica.
5. Ocorrência de melhorias econômicas de curto prazo.	5. Melhoria das condições de trabalho dos empregados.
6. Novas oportunidades de negócios.	6. Aumento da motivação dos empregados.
7. Minimização dos riscos no campo das obrigações ambientais.	7. Diversidade de benefícios para as empresas, bem como para toda a sociedade.
8. Redução dos encargos ambientais causados pela atividade industrial.	8. Indução do processo de inovação dentro das empresas.
	9. Aumento da segurança dos consumidores dos produtos.

2.9 Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis (Ecodesign) e Green Lean

“Design” provém da palavra latina *designare*, que significa designar ou escolher. Segundo dicionário Webster, design é “esboçar, traçar ou planejar como ação ou trabalho (...) para conceber, inventar, produzir”.

Segundo Norton (2013), o objetivo final do projeto de máquinas é dimensionar e dar forma às peças e escolher os materiais e os processos de manufatura

apropriados, permitindo que a máquina possa desempenhar a função desejada, sem falhar. A seleção do material deve considerar as propriedades físicas e mecânicas, adequando as expectativas depositadas.

O projeto do componente pode afetar o material a ser utilizado, e tanto o projeto do componente quanto o material utilizado influenciam a seleção das técnicas de fabricação (Callister e Rethwisch, 2013).

Segundo Ministério do Meio Ambiente (2017), ecodesign é:

- a) Seleção de materiais de baixo impacto ambiental - menos poluentes, não tóxicos, de produção sustentável ou reciclados, ou ainda que requeiram menos energia na fabricação;
- b) Eficiência energética - minimização do consumo de energia para os processos de fabricação;
- c) Qualidade e durabilidade - produtos mais duráveis, com maior confiabilidade e que funcionem melhor, a fim de gerar menos lixo;
- d) Modularidade - objetos com peças intercambiáveis, que possam ser trocadas em caso de defeito, evitando a troca de todo o produto, o que também gera menos lixo;
- e) Reutilização e Reaproveitamento - projetar produtos para sobreviver ao ciclo de vida, podendo ser reutilizados ou reaproveitados para outras funções após o primeiro uso.

Conforme Guimarães (2006), considera-se concepção sustentável quando o produto é concebido levando-se em consideração os recursos naturais locais e as necessidades também locais, e é projetado para uso por uma ou mais pessoas, com tempo de vida o mais longo possível. Se ainda é projetado para reassumir outra forma ou outra função como novo produto, e quanto mais este ciclo se repetir, mais sustentável é o projeto.

Ressalta-se, portanto, que o produto só pode ressurgir como outro produto sustentável se ele for pensado para ser facilmente desmontável e montável em sistema produtivo que use o mínimo de recursos, não gere resíduos e não imponha dano aos seres humanos envolvidos na produção e no uso. A utilização de materiais mais leves facilita o manuseio durante as atividades de montagem, pois a redução

de peso torna o manuseio mais ágil e menos desgastante, melhorando a ergonomia (Guimarães, 2006).

Ecodesign é a ferramenta de design que considera as questões ecológicas, propostas pela UNEP (“United Nations Environment Programme-Industry and Environment”). A técnica ecodesign, descrita pela norma ISO TR 14062, auxilia no desenvolvimento de produto e na antecipação das ameaças potenciais para alavancar as vantagens competitivas e as oportunidades (Guimarães, 2006).

Em 2014, a lei da política nacional de resíduos sólidos, que responsabiliza fabricantes pelo descarte de produtos após o consumo, obriga as empresas a planejar estrategicamente o desenvolvimento dos produtos e serviços. Há necessidade de repensar os processos de negócio desde a concepção do produto até o novo modelo comercial (além de vender, as empresas negociam o direito de uso por um período ou cobram pela manutenção ou pela intensidade de uso). Pode-se chamar de economia circular, em que todos os produtos duráveis devem ser desenvolvidos com o propósito de se transformar em outros ao fim da vida útil (França, 2014).

Slack et al. (2018) e Ohno (1997) descrevem os sete desperdícios (perdas):

- 1) Superprodução - produzir mais do que é necessário para o próximo processo na produção, gerando estoque que se transforma em custo e não agrega valor ao cliente, considerado o mais relevante dos 7 desperdícios.
- 2) Estoque - consome e imobiliza recursos, e esse desperdício pode ser resultado da superprodução de produtos acabados ou da falta de nivelamento no processo produtivo, gerando acúmulo de produtos inacabados entre os processos.
- 3) Transporte - desperdício gerado pela circulação desordenada e excessiva de matérias-primas, componentes ou produtos acabados no processo de produção.
- 4) Movimentação - relacionado à movimentação dos operadores, não agregando valor ao trabalho.
- 5) Defeitos - o desperdício de qualidade, em retrabalho ou na perda de peça que consome recurso, gerando aumento dos custos e não agregando valor ao cliente.
- 6) Processos desnecessários - operações que utilizam recursos e não são revertidas em ganhos adicionais devem ser eliminadas.

7) Espera - tempo sem trabalho, ou seja, tempo utilizado nas atividades da empresa que não agregam valor, por exemplo, espera de peças, ferramentas, suprimentos, informações, etc.

Segundo Liker (2005), existe o oitavo desperdício, que é o da falta de criatividade dos funcionários. A empresa perde tempo, ideias, habilidades, melhorias e oportunidades de aprendizagem por não envolver ou ouvir os funcionários.

O conceito Lean surgiu na indústria automobilística japonesa com o STP (Sistema Toyota de Produção), introduzindo a flexibilidade na produção. Segundo Womack et al. (1990), o objetivo principal do STP é a redução de custos alcançada por meio do controle de qualidade, gestão da qualidade e melhorias no ambiente de trabalho.

No projeto do produto, devem-se ainda planejar os processos de fabricação (Slack et al., 2018), aplicando o STP; e por meio da produção enxuta (“Lean Production”), consegue-se redução dos custos de produção, diminuindo as perdas e melhorando o desempenho do material (Caldera et al., 2017). Chiarini (2014) afirma ainda que ocorre diminuição de consumo de energia elétrica e emissão de resíduos com a utilização desse sistema de produção. Para Barth e Melin (2018), o sistema Lean está em crescimento no setor agroalimentar. Simons e Zokaei (2005) relataram o sistema Lean na indústria de carne vermelha na Inglaterra, demonstrando os benefícios da produção enxuta na análise da cadeia de valor (Caldera et al., 2017).

O termo “Green Lean” tem sido utilizado para vincular produção enxuta com desenvolvimento sustentável (gestão ambiental). Aplicando “Green Lean”, conclui-se que os métodos de “Lean Production” influenciam positivamente o desenvolvimento ambiental, métodos tais como: 5S, manufatura celular, “Lean Supply Chain Management”, “Total Productive Maintenance” (TPM, Manutenção Produtiva Total) e “Value Stream Mapping” (VSM, mapeamento de fluxo de valor) (Caldera et al., 2017). Garza-Reyes et al. (2018) indicam que a abordagem proposta para o E-VSM (VSM do meio ambiente), baseada na ferramenta da qualidade PDCA (“plan”, “do”, “check” e “action”), pode ser alternativa eficaz para melhorar o desempenho ambiental das operações.

O transporte também influencia a seleção, na aquisição de materiais e na prestação de serviços, devido à dimensão continental do Brasil. Isso pode inviabilizar a seleção de alguns materiais em relação à sustentabilidade energético-ambiental (MME, 2019). Ahanchian e Biona (2014) estudaram energia incorporada e emissões ambientais no transporte terrestre, propondo alternativas para a redução de 27,8% no consumo de energia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma empresa que fabrica os equipamentos utilizados na usina de beneficiamento de algodão, localizada no interior do Estado de São Paulo (latitude -20,449625 e longitude -47,836971). Realizou-se a análise de três equipamentos fabricados com tecnologia nacional.

Os equipamentos avaliados foram: alimentador extrator automático (grelha quadrada) para a realização de limpeza fina do algodão em caroço, com capacidade de 15 a 60 fardos por hora, massa do equipamento de 7.900 kg e 565 componentes (E1); descaroador com 200 serras, com capacidade acima de 15 fardos por hora; massa do equipamento de 6.200 kg e 718 componentes (E2); prensa hidráulica para enfardamento de algodão, com sistema de prensagem “downpacking” e capacidade de 60 fardos por hora; massa do equipamento de 30.980 kg e 342 componentes (E3).

O Alimentador Extrator (grelha quadrada) (E1) proporciona constante e uniforme alimentação do descaroador. É construído com rotores batedores de 355,6 mm (14”), rotores de serra de canal de 508 mm (20”) de diâmetro e 3.048 mm (120”) de largura, permite maior fluxo do algodão, com máximo desempenho na limpeza e na alimentação. Na Figura 5, têm-se as dimensões principais do equipamento E1 por meio da vista frontal. A Figura 6 mostra as dimensões principais por meio da vista lateral.

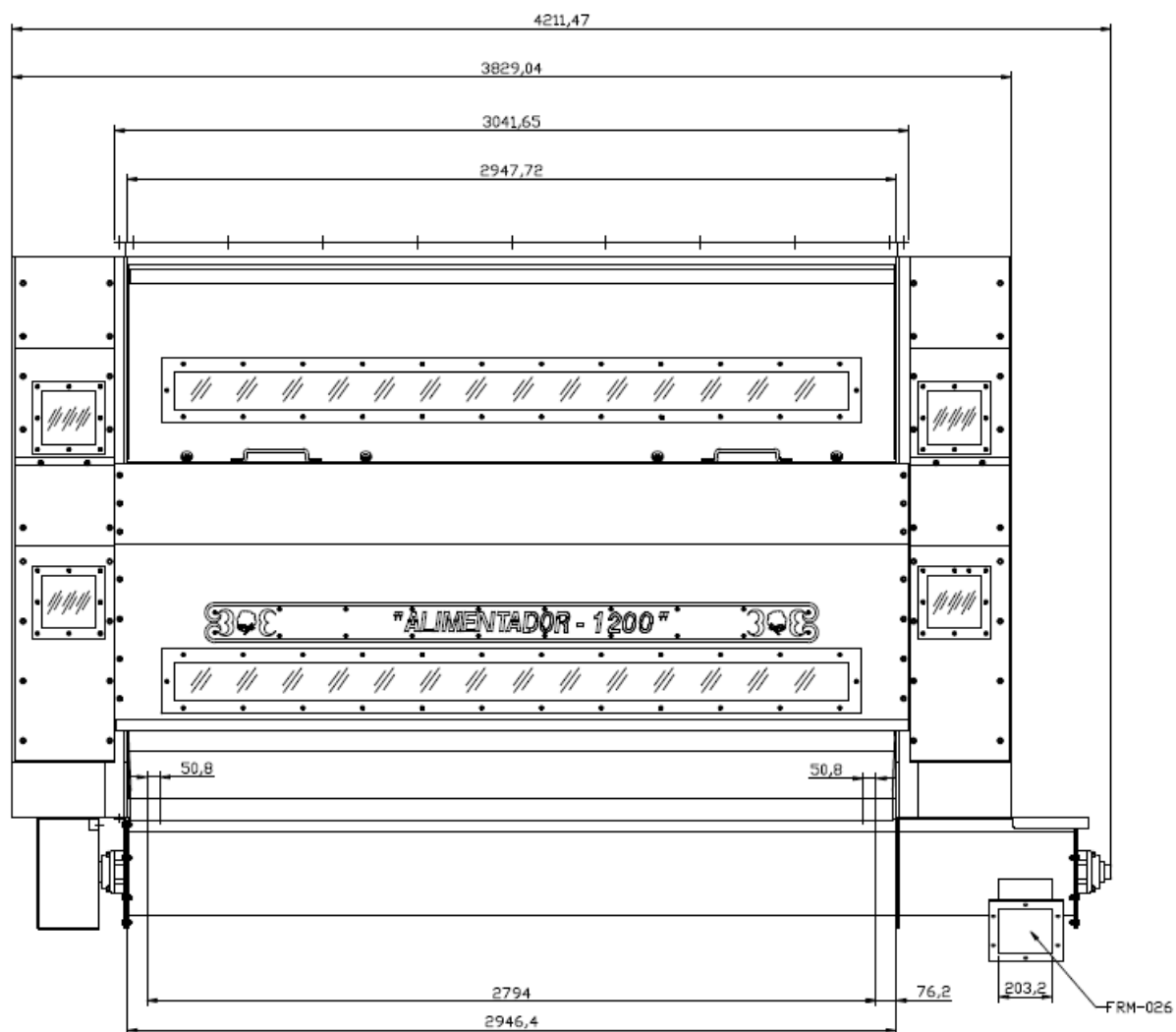


Figura 5. Alimentador Extrator - grelha quadrada (vista frontal).

(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

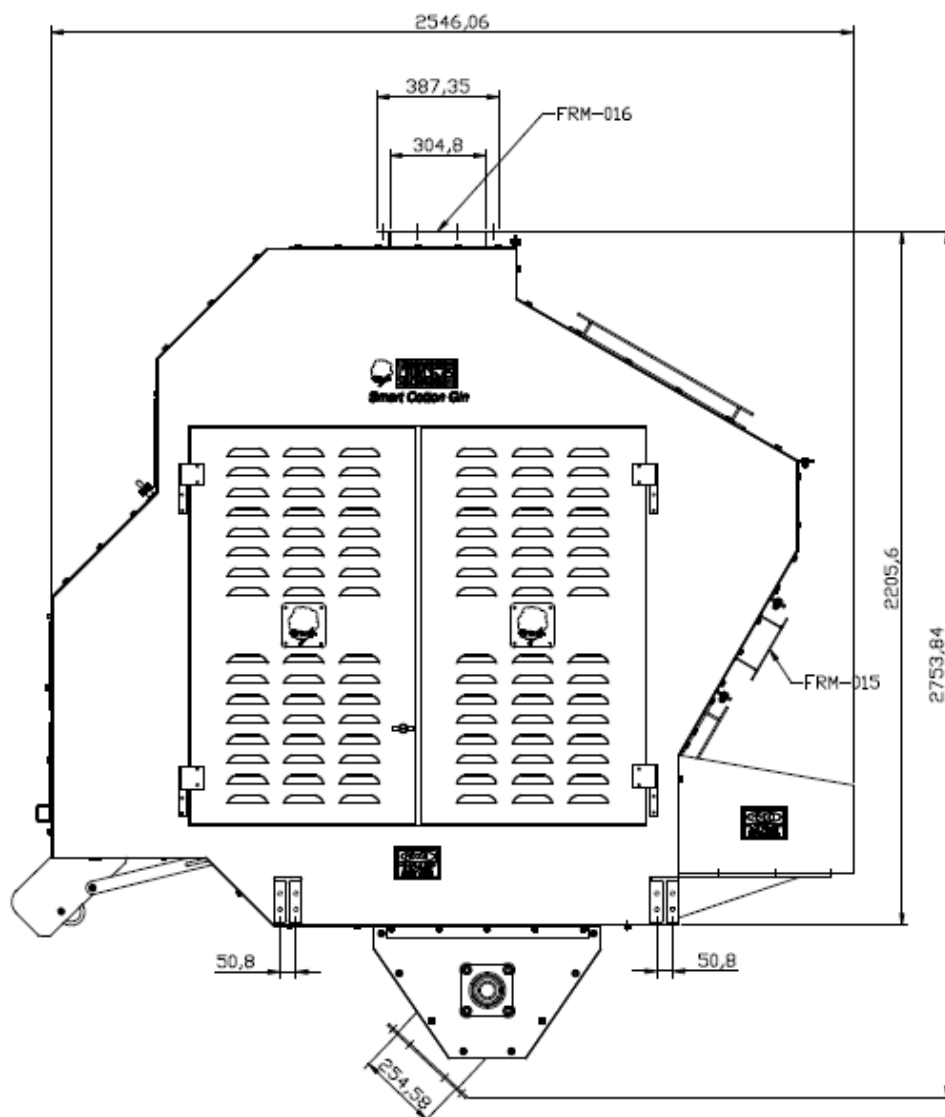


Figura 6. Alimentador Extrator - grelha quadrada (vista lateral).

(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

As especificações técnicas do equipamento E1 são:

- a) Alimentadora automática equipada com 2 cilindros alimentadores acionados por engrenagens, correntes e motorreductor de 735,5 W (1 cv) e rotação de 1.800 rpm; 4 cilindros de pinos limpadores com diâmetro de 355,6 mm (14") acionados por correias sincronizadoras pelo motor de 11,032 kW (15 cv) e rotação de 1.800 rpm; instalados sobre grelhas limpadoras construídas com barras quadradas de 9,525 mm (3/8") e com 2 cilindros de serras de canal com diâmetro de 508 mm (20"), eixo de 61,91 mm (2 7/16") e largura de 3.048 mm (120") com grelhas individuais.

- b) Controle de alimentação e dispositivos eletrônicos gerenciam o fluxo de algodão. Barras de escovas limpadoras de náilon.
- c) Roscas transportadoras de cascas com diâmetro de 304,8 mm (12"), com acionamento por engrenagens e correntes.
- d) Bica de alimentação para descaroador, com regulagem de inclinação, fabricada em aço inoxidável.
- e) Flanges para maior saída de pó.
- f) Portas de acesso para manutenção.
- g) Laterais da máquina fabricadas em chapa com espessura de 9,525 mm (3/8"). Inclui suporte de sustentação traseira e proteções para os acionamentos das transmissões, da rosca transportadora de cascas e dos motores.

O equipamento E1 possui 565 componentes (Tabela 5). Cada componente tem especificações diversas, tais como: dimensões, materiais, tratamento superficial e tratamento térmico. Como a maior variedade dos componentes ocorre em relação às dimensões e ao tipo de material, optou-se por agrupar os componentes por tipo de elementos mecânicos com características semelhantes.

Tabela 5. Componentes do equipamento E1.

Adesivo	Parafuso allen com cabeça
Anel de retenção	Parafuso allen sem cabeça
Arruela de pressão	Parafuso autoatarrachante
Arruela lisa	Parafuso cabeça quadrada pressão
Barra chata	Parafuso fenda cabeça abaulada
Barra roscada	Parafuso fenda cabeça chata
Barra seção circular	Parafuso francês
Barra seção quadrada	Parafuso sextavado
Bica de descarga alimentadora	Pino
Borracha esponjosa	Pino elástico
Bucha	Polia
Bucha cônica	Porca aperto
Bucha fixação	Porca chapéu
Cantoneira	Porca quadrada
Chapa	Porca sextavada
Chaveta	Rolamento
Correia	Roldana
Corrente	Rolo alimentador
Cubo	Rosca sem fim
Eixo	Serra de canal (meia-lua)
Engrenagem	Teflon
Flange	Tubo seção circular
Flange mancal	Tubo seção quadrada
Mola de tração	Viga I
Motor elétrico 11,032 kW 1.800 rpm	Viga U
Motorreductor 735,5 W 1.800 rpm	Viga U mão francesa

O Descaroador com 200 serras, com catador de piolho (E2), tem suas dimensões principais mostradas na Figura 7 (vista frontal) e Figura 8 (vista lateral).

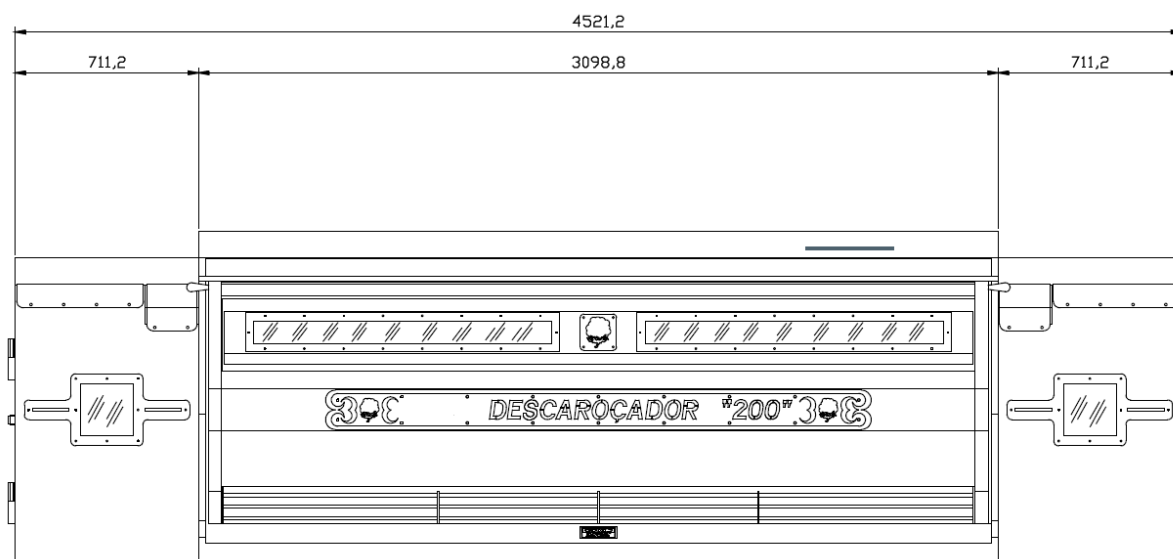


Figura 7. Descaroçador com 200 serras, com catador de piolho (vista frontal).
(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

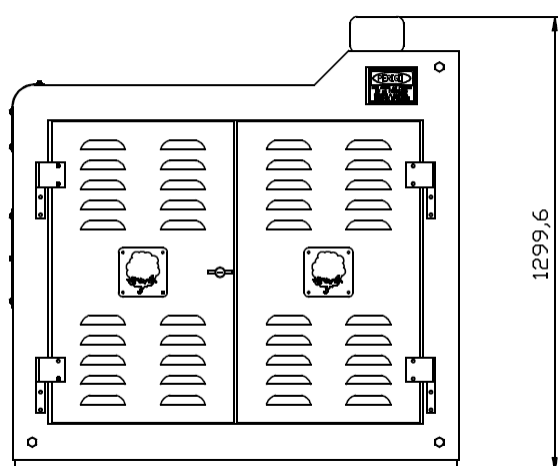


Figura 8. Descaroçador com 200 serras, com catador de piolho (vista lateral).
(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

As especificações técnicas do equipamento E2 são:

- a) Descaroçador com 200 serras de diâmetro com 304,8 mm (12") e espessura de 1,14 mm, instaladas em eixo maciço de alta resistência, com diâmetro de 120,65 mm (4 3/4"), com rolamentos de rolos autocompensadores de alta performance, com largura nominal de 2.946 mm (116").
- b) Composto por 1 rolo agitador de algodão com diâmetro de 114,3 mm (4 1/2"), 1 "pick roller" e 1 rolo de escovas, com diâmetro de 469,9 mm (18 1/2").

- c) Sistema de tração composto por 5 correias em V, com motor de 110,325 kW (150 cv) para o eixo de serras e cilindro de escovas.
- d) Possui dispositivo de ajuste manual para controlar o fluxo na caixa de sementes.
- e) Inclui barras de fixação superior e inferior para maior estabilidade das costelas.
- f) Frente retrátil equipada com sensores e sistema automático de abertura para manutenção, e fechado com acrílico na parte inferior da saída do caroço.
- g) As laterais do equipamento são fabricadas em chapa com espessura de 25,4 mm (1") garantindo maior resistência e estabilidade de trabalho.
- h) Painel de comando de simples operação com controle automático de carga.

O equipamento E2 possui 718 componentes (Tabela 6). Cada componente tem especificações diversas, tais como: dimensões, materiais, tratamento superficial e tratamento térmico. Como a maior variedade dos componentes ocorre em relação às dimensões e ao tipo de material, optou-se por agrupar os componentes por tipo de elementos mecânicos com características semelhantes. Verifica-se maior variedade de componentes mecânicos em comparação com equipamento E1.

Tabela 6. Componentes do equipamento E2.

Anel de retenção	Manopla
Arruela de pressão	Motor elétrico 7,35 kW (10 cv) 1.800 rpm
Arruela lisa	Motor elétrico 110,325 kW (150 cv) 1.200 rpm
Arruela quadrada	Motorreductor 735,5 W (1 cv)
Barra chata	Parafuso allen com cabeça
Barra roscada	Parafuso allen sem cabeça
Barra seção circular	Parafuso cabeça escareada sextavado interno
Barra seção quadrada	Parafuso cabeça quadrada pressão
Borracha	Parafuso de ajuste do pivô
Bucha	Parafuso fenda
Cantoneira	Parafuso sextavado
Chapa	Pino
Chaveta	Pino elástico
Cilindro agitador descarçador	Polia
Cilindro pneumático	Porca aperto
Correia	Porca chapéu cega
Corrente	Porca espaçadora
Costela 200 serras	Porca quadrada
Costela descarçador 200 serras	Porca sextavada
Descarga sujeira descarçador	Rebite alumínio
Disco rolo agitador	Rolamento
Dobradiça	Rolo 200 serras completo sem mancal
Eixo	Rolo escovas descarçador
Engrenagem	Rolo "picker" 200 serras
Filtro de ar	Rosca sem-fim
Flange	Separador 200 serras
Garfo do cilindro pneumático descarçador	Separador central 200 serras
Kit cantoneira porca	Serra disco
Kit luminária descarçador	Silenciador com controle vazão
Kit motor descarçador	Tubo seção circular
Kit pneumático descarçador	Tubo seção retangular
Lâmpada	Válvula
Mancal	Viga H
Manômetro	

A Prensa Hidráulica para enfardamento de algodão (E3) está representada em perspectiva isométrica, na Figura 9, vista frontal (Figura 10) e vista lateral (Figura 11).

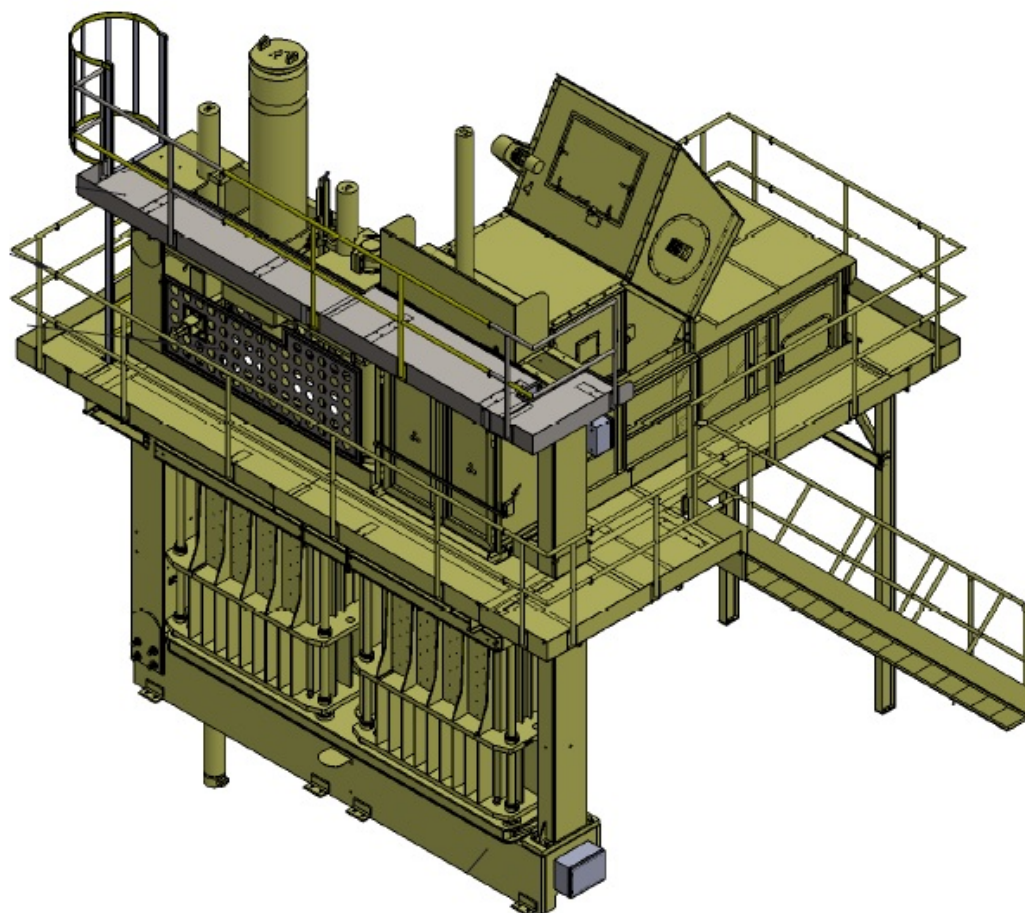


Figura 9. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (isométrico).
(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

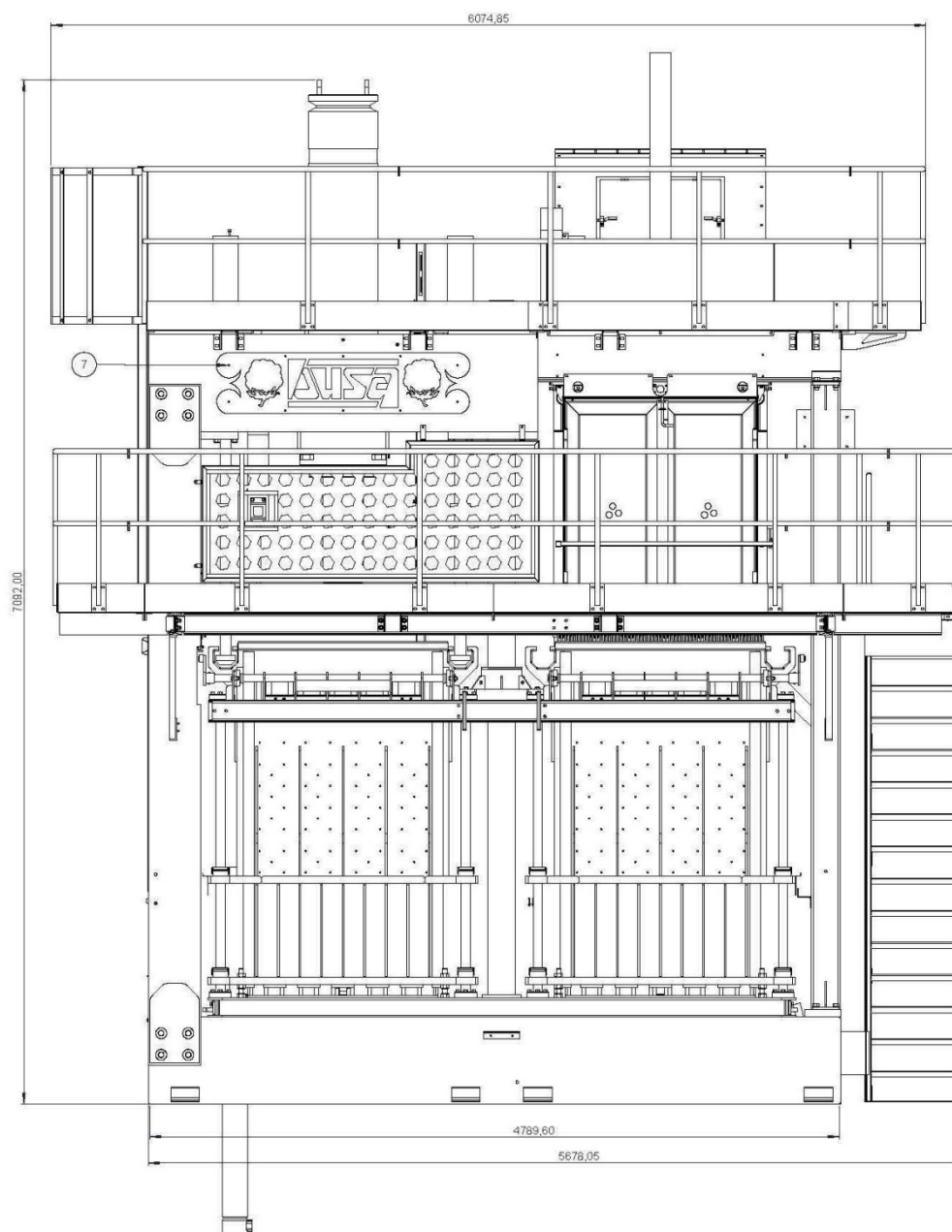


Figura 10. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (vista frontal).
(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

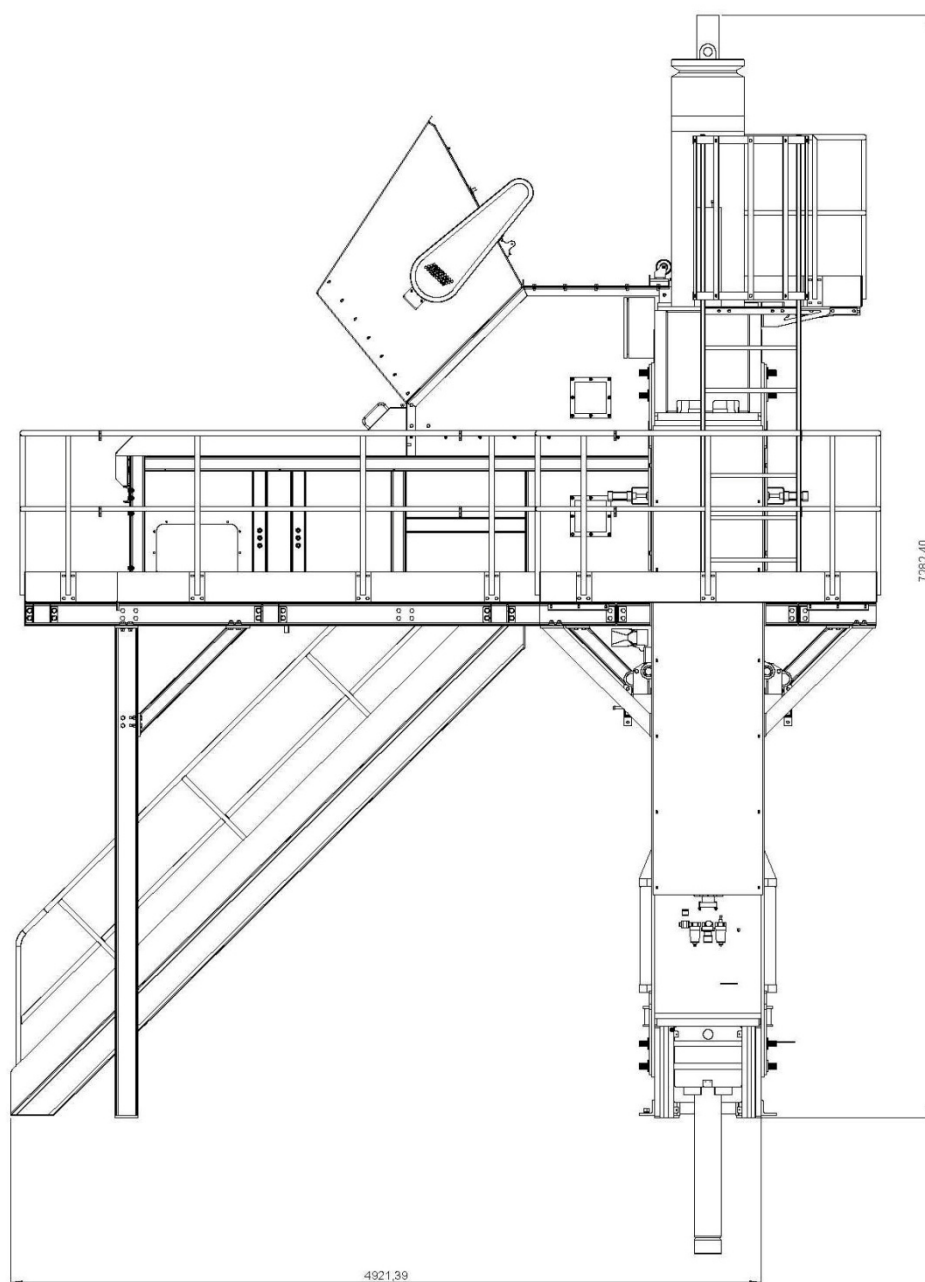


Figura 11. Prensa Hidráulica para Enfardamento de Algodão (vista lateral).
(Autoria de uma empresa de Indústria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda.)

As especificações técnicas do equipamento E3 são:

- a) Equipada com caixa inteiriça retrátil (“liftbox”) e ejetora de fardos automática e dimensionada para não sofrer torções.
- b) Sistema empurrador com válvula proporcional desenvolvendo movimentos com paradas suaves.

- c) Levantamento de caixa dimensionado para executar força de retração acima de 560 kN e com blocos e bombas independentes.
- d) Levantamento da mesa com cilindros hidráulicos. Sistema hidráulico equipado com filtros de pressão com alta capacidade de filtragem e com sistemas de aviso de saturação (entupimento do elemento filtrante) elétrico, garantindo fluido (óleo hidráulico) sempre limpo.
- e) Platos dimensionados para amarração com arame, predisposta para receber amarração automática.
- f) Ejeção dos fardos realizada por cilindros pneumáticos com sistema de trava de segurança.
- g) Sistema elétrico com interface entre máquina e operador (IHM), com mensagens de falha, apontamento de falhas (sensores fora de posição) e funções de regulação de peso do fardo por meio da pressão do cilindro calcador.

O equipamento E3 possui 342 componentes (Tabela 7). Cada componente tem especificações diversas, tais como: dimensões, materiais, tratamento superficial e tratamento térmico. Como a maior variedade dos componentes ocorre em relação às dimensões e ao tipo de material, optou-se por agrupar os componentes por tipo de elementos mecânicos com características semelhantes. Verifica-se menor variedade de componentes mecânicos em comparação com equipamento E1 e E2, mas seus componentes têm dimensões superiores.

Tabela 7. Componentes do equipamento E3.

Abraçadeira	Gaxeta
Acoplamento	Luva de redução
Adaptador macho/fêmea	Mangueira
Adesivo	Manômetro
Amortecedor	Mola compressão
Anel de retenção	Motobomba centrífuga
Anel de vedação	Motor elétrico 7,35 kW (10 cv) 1.800 rpm
Anel O-ring	Motor elétrico 91,93 kW (125 cv) 1.800 rpm
Arruela de pressão	Motor elétrico 55,16 kW (75 cv) 1.800 rpm
Arruela lisa	Motor hidráulico
Arruela quadrada	Parafuso allen com cabeça
Barra chata	Parafuso allen sem cabeça
	Parafuso cabeça escareada sextavado interno
Barra roscada	Parafuso fenda cabeça abaulada
Barra seção circular	Parafuso fenda cabeça chata
Barra seção quadrada	Parafuso francês
Barra seção sextavada	Parafuso sextavado
Bomba hidráulica	Pino elástico
Bucha	Porca chapéu cega
Bucha cônica	Porca quadrada
Cantoneira	Porca sextavada
Chapa	Registro de esfera
Chave de nível	Rolamento
Chumbador com prisioneiro	Sensor magnético
Cilindro hidráulico	Silenciador simples
Cilindro pneumático	Torre de resfriamento
Conexão	Transmissor de pressão
Conjunto 3 válvulas pneumáticas	Transmissor de temperatura
Contraflange	Trocador de calor
Contrapino	Tubo poliuretano
Corrente	Tubo seção circular com costura
Cotovelo 90°	Tubo seção circular sem costura
Coxim	Tubo seção quadrada
Engraxadeira	Tubo seção retangular
Engrenagem	Válvula
Escova	Viga H
Feltro industrial	Viga I
Filtro	Viga U
Flange	

Estes equipamentos são pintados por meio de processo de pintura líquida industrial.

As variáveis coletadas foram: matéria-prima (kg e m³) (tipo de material de cada componente do equipamento em massa ou volume); consumo de energia elétrica nos processos de fabricação (kWh); tempo homem/hora trabalhada (h).

Normalmente, as indústrias não utilizam as informações dos insumos em função da massa (kg) ou do volume (litros ou m³). As indústrias controlam as peças em unidades; as chapas em m²; e as barras, cantoneiras, tubos e vigas são controlados pelo comprimento (m). Com as informações das dimensões e das massas específicas dos componentes, realizaram-se conversões para as unidades em kg ou m³ (equação 1).

$$m = \rho \cdot V \quad (1)$$

Em que,

m: massa do componente (kg);

ρ : massa específica (kg m⁻³);

V: volume do componente (m³).

Realizou-se coleta dos tempos por meio de estudo de tempos e de métodos nas visitas técnicas, utilizando-se de cronômetro centesimal e filmagem.

De acordo com Barnes (1977), estudo de tempos e métodos é o estudo sistemático dos sistemas de trabalho com objetivo de tornar determinada operação eficiente e padronizada.

O tempo padrão é o tempo de produção de uma unidade ou lote da mesma peça, segundo metodologia de estudos de tempos e de métodos (Martins e Laugeni, 2005).

Utilizou-se a seguinte metodologia para calcular o tempo de cada processo de fabricação dos componentes (equação 2).

$$TP(\text{lote}) = T_{\text{produção lote}} + \Sigma T_{\text{setup}} + \Sigma T_{\text{espera}} + \Sigma T_{\text{movimentação}} + \Sigma T_{\text{manutenção}} \quad (2)$$

Em que,

TP(lote): tempo padrão para lote de mesma peça para cada processo de fabricação;

$T_{\text{produção lote}}$: tempo de operação da máquina;

T_{setup} : tempo de “setup”;

T_{espera} : tempo de máquina parada aguardando produção;

$T_{\text{movimentação}}$: tempo de movimentação dos componentes;

$T_{\text{manutenção}}$: tempo necessário para realização de manutenção.

Nos processos de usinagem, utiliza-se a troca rápida de ferramenta SMED (“Single Minute Exchange of Die”), com objetivo de redução do tempo de “setup”.

Com estes dados, obtêm-se o tempo para cada processo de fabricação, o tempo homem/hora e o consumo de energia em kWh.

O cálculo de energia incorporada é o somatório de índices de energia incorporada, conforme equação 3.

$$EI_{\text{total}} = \Sigma EI \cdot A \quad (3)$$

Em que,

EI_{total} : energia incorporada (MJ);

EI: índice de energia incorporada da atividade (MJ kg^{-1} ou MJ L^{-1});

A: atividade (kg ou L).

O cálculo do inventário de emissão de GEE é o somatório dos fatores de emissão, conforme a equação 4.

$$E = \Sigma FE \cdot A \quad (4)$$

Em que,

E: emissão do poluente ($\text{kg CO}_2\text{e}$);

FE: fator de emissão ($\text{kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ ou $\text{kg CO}_2\text{e L}^{-1}$);

A: atividade (kg ou L).

Para cada insumo direto representado pela unidade de medida (kg, h e kWh), há o respectivo índice de energia incorporada (Tabela 8), e os resultados, apresentados em MJ unidade⁻¹.

Tabela 8. Índices de energia incorporada por insumo.

Insumo	energia incorporada		Referência Bibliográfica
Aço-carbono (laminado a quente)	48,40	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Aço inoxidável	81,80	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Alumínio	218,00	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Borracha	101,70	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Bronze	88,00	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Ferro fundido	36,30	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Papel	28,20	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Polietileno	83,10	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Fibra de algodão	143,00	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Tinta	68,00	MJ kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Mão de obra	2,20	MJ h ⁻¹	Serra et al. (1979)
Energia Elétrica	3,60	MJ kWh ⁻¹	3,60 MJ = 1,00 kWh

Analisando somente a matéria-prima, o maior índice de energia incorporada é referente ao material alumínio.

Na Tabela 9, verifica-se a % do índice de energia incorporada dos materiais metálicos (aço inoxidável, bronze, aço-carbono e ferro fundido), em relação ao material alumínio. Verifica-se a importância do índice de energia incorporada do material metálico alumínio, cerca de 350% superior ao do material aço-carbono.

Tabela 9. Comparativo dos índices de energia incorporada entre os metais, como referência o alumínio.

Alumínio	100,0%
Bronze	40,4%
Aço Inoxidável	37,5%
Aço-Carbono	22,2%
Ferro Fundido	16,7%

Para cada insumo direto representado pela unidade de medida (kg, L, h), há o respectivo fator de emissão (Tabela 10), e os resultados, apresentados em MJ unidade⁻¹ e kg CO₂e unidade⁻¹, respectivamente.

Tabela 10. Fator de emissão CO₂e por insumo.

Insumo	Fator de Emissão		Referência Bibliográfica
Aço-carbono (laminado a quente)	3,19	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Aço inoxidável	6,15	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Alumínio	15,00	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Berge (2009)
Borracha	3,18	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Bronze	4,39	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Ferro fundido	1,91	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Papel	1,50	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Polietileno	1,94	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Fibra de algodão	6,78	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Tinta	3,56	kg CO ₂ e kg ⁻¹	Hammond e Jones (2008)
Mão de obra	0,43	kg CO ₂ e h ⁻¹	Iniciativa Verde (2018)
Energia Elétrica	0,0927	kg CO ₂ e kWh ⁻¹	Fator médio - Inventários corporativos (2018): referente ano 2017

Para calcular o fator de emissão de CO₂e da mão de obra trabalhada por hora, utilizou-se a calculadora (Iniciativa Verde, 2018), considerando dieta basicamente consumindo equilibradamente carne bovina, carne de frango e carne de porco.

Analisando-se somente a matéria-prima, o maior fator de emissão é referente ao material alumínio.

Na Tabela 11, verifica-se a % do fator de emissão de CO₂e dos materiais metálicos (aço inoxidável, bronze, aço-carbono e ferro fundido) em relação ao material alumínio. Verifica-se a importância do fator de emissão do material metálico alumínio, cerca de 370% superior ao do material aço-carbono.

Tabela 11. Comparativo dos fatores de emissão de CO₂e entre os metais, como referência o alumínio.

Alumínio	100,0%
Aço Inoxidável	41,0%
Bronze	29,3%
Aço-Carbono	21,3%
Ferro Fundido	12,7%

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificam-se, na Tabela 12, as massas (kg) por tipo de material utilizado para a fabricação dos componentes. O material aço-carbono predomina na composição dos equipamentos, e os demais materiais têm pouca utilização em relação à massa.

Tabela 12. Informações da massa (kg) por tipo de material dos equipamentos E1, E2 e E3.

Material	EQUIPAMENTO		
	E1 (kg)	E2 (kg)	E3 (kg)
Aço-Carbono	14.419,641	11.043,736	47.158,902
Aço Inoxidável	652,029	656,267	23,968
Alumínio	-	0,030	-
Borracha	14,376	12,171	145,385
Bronze	-	1,617	39,000
Ferro Fundido	119,452	779,669	1.385,414
Papel	0,338	-	0,439
Polietileno	2,777	1,800	50,053
Fibra de Algodão	1,746	-	-
Tinta	33,000	30,000	96,000

Verificam-se, na Tabela 13, as proporções por tipo de material para cada equipamento. O material metálico aço-carbono predomina na composição dos três equipamentos (equipamento E1 94,60%, E2 88,17% e E3 96,44%).

Tabela 13. Porcentagem de cada insumo na composição do equipamento.

Material	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
Aço-Carbono	94,60%	88,17%	96,44%
Aço Inoxidável	4,28%	5,24%	0,05%
Alumínio	-	0,01%	-
Borracha	0,09%	0,10%	0,30%
Bronze	-	0,01%	0,08%
Ferro Fundido	0,78%	6,22%	2,83%
Papel	0,00%	-	0,00%
Polietileno	0,02%	0,01%	0,10%
Fibra de Algodão	0,01%	-	-
Tinta	0,22%	0,24%	0,20%
TOTAL	100 %	100 %	100 %

Observa-se que o equipamento E2 utiliza menos material aço-carbono que os demais, devido à utilização do material ferro fundido, pouco utilizado nos outros dois equipamentos.

Para Hammond e Jones (2008), não existe distinção entre índice de energia incorporada e fator de emissão de CO₂e para os diversos tipos de aço (Tabela 8 e Tabela 10).

O equipamento E1 utiliza aço-carbono tipo AISI/SAE 1010, 1020, 1045, 1070 e ASTM A36; E2 utiliza aço-carbono AISI/SAE 1010, 1020, 1045, 1070, 4140 e ASTM A36; E3 utiliza aço-carbono AISI/SAE 1010, 1020, 1045 e ASTM A36.

O tipo de aço inoxidável utilizado em ambos os equipamentos é o AISI 304 e 316, diferenciado pela composição química. O aço inoxidável AISI 304 possui a composição de 0,08% C, 19% Cr, 9% Ni e 1,5% Mn. O aço inoxidável AISI 316 possui a composição de 0,03% C, 17% Cr, 12% Ni, 2,0% Mn e 2,5% Mo. Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão (Callister e Rethwisch, 2013).

Os materiais metálicos ferrosos (aço-carbono, aço inoxidável e ferro fundido) têm maior porcentagem na composição dos três equipamentos (Tabela 13): 99,66% equipamento E1; 99,64% equipamento E2, e 99,32% equipamento E3, sugerindo importância destes materiais na composição destes equipamentos (Tabela 14).

Tabela 14. Porcentagem de material ferroso e não ferroso na composição do equipamento.

Material	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
Ferroso	99,66%	99,64%	99,32%
Não ferroso	0,00%	0,01%	0,08%
Demais	0,34%	0,35%	0,60%

Em 2017, a produção mundial de aço bruto totalizou 1,674 bilhão de toneladas. O Brasil produziu cerca de 34,35 milhões de toneladas, tendo consumo de metal ferroso de 22,087 milhões de toneladas; o consumo de metal não ferroso corresponde a 6,65% em relação ao metal ferroso (MME, 2018).

Na Tabela 15, verificam-se os formatos predominantes dos insumos em relação à massa (kg). Os equipamentos utilizam predominantemente chapa de aço-carbono de diversas espessuras (produto laminado).

Tabela 15. Descrição do formato do insumo (kg) por tipo de material.

Material	Formato	EQUIPAMENTO		
		E1	E2	E3
Aço-Carbono	barra	1.681,490	801,906	8.992,864
Aço-Carbono	barra chata	-	516,857	-
Aço-Carbono	cantoneira	378,876	937,020	757,688
Aço-Carbono	chapa	7.812,620	5.521,142	23.255,327
Aço-Carbono	forjado	11,810	10,496	1.134,166
Aço-Carbono	parafuso	51,165	48,722	2.185,097
Aço-Carbono	porca	13,899	7,282	67,943
Aço-Carbono	tubo	2.110,655	685,505	2.500,463
Aço-Carbono	usinado	1.626,893	2.176,677	6.867,422
Aço-Carbono	viga	732,233	338,130	1.397,932
Aço Inoxidável	chapa	602,140	643,425	-
Aço Inoxidável	parafuso	0,043	-	-
Aço Inoxidável	porca	0,866	0,492	-
Aço Inoxidável	tubo	14,460	-	-
Aço Inoxidável	usinado	34,520	12,350	23,968
Alumínio	-	-	0,030	-
Borracha	-	14,376	12,171	145,385
Bronze	-	-	1,617	39,000
Ferro Fundido	barra chata	119,452	578,669	928,539
Ferro Fundido	barra redonda	-	-	456,875
Ferro Fundido	usinado	-	201,000	-
Papel	-	0,338	-	0,439
Polietileno	-	2,777	1,800	50,053
Fibra de Algodão	-	1,746	-	-
Tinta	-	33,000	30,000	96,000

Na Tabela 16, verifica-se que os equipamentos utilizam, predominantemente, chapa de aço (produto laminado): E1 55,20%; E2 49,22%, e E3 47,56%. Quando utiliza chapa metálica, são necessários os processos de corte (a laser, a plasma, por guilhotina e por serra), dobramento e soldagem (Ablat e Qattani, 2018; Sharma e Yadava, 2018; Mosen e Weinert, 2015; Singh e Chattopadhyaya, 2015), aumentando o consumo de energia e a emissão de GEE. As chapas metálicas têm grandes dimensões, necessitando de equipamentos de movimentação

(empilhadeiras e pontes rolantes) e possuem maior área para tratamento superficial, no caso pintura.

Tabela 16. Descrição do formato do insumo por tipo de material (%).

Material	Formato	EQUIPAMENTO		
		E1	E2	E3
Aço-Carbono	barra	11,03%	6,40%	18,39%
Aço-Carbono	barra chata	0,00%	4,13%	-
Aço-Carbono	cantoneira	2,49%	7,48%	1,55%
Aço-Carbono	chapa	51,25%	44,08%	47,56%
Aço-Carbono	forjado	0,08%	0,08%	2,32%
Aço-Carbono	parafuso	0,34%	0,39%	4,47%
Aço-Carbono	porca	0,09%	0,06%	0,14%
Aço-Carbono	tubo	13,85%	5,47%	5,11%
Aço-Carbono	usinado	10,67%	17,38%	14,04%
Aço-Carbono	viga	4,80%	2,70%	2,86%
Aço Inoxidável	chapa	3,95%	5,14%	-
Aço Inoxidável	parafuso	0,00%	0,00%	-
Aço Inoxidável	porca	0,01%	0,00%	-
Aço Inoxidável	tubo	0,09%	0,00%	-
Aço Inoxidável	usinado	0,23%	0,10%	0,05%
Alumínio	-	0,00%	0,00%	-
Borracha	-	0,09%	0,10%	0,30%
Bronze	-	0,00%	0,01%	0,08%
Ferro Fundido	barra chata	0,78%	4,62%	1,90%
Ferro Fundido	barra redonda	-	-	0,93%
Ferro Fundido	usinado	0,00%	1,60%	-
Papel	-	0,00%	0,00%	0,00%
Polietileno	-	0,02%	0,01%	0,10%
Fibra de Algodão	-	0,01%	0,00%	-
Tinta	-	0,22%	0,24%	0,20%

No Brasil, em 2017, cerca de 86,78% do consumo de metal ferroso correspondem a produtos laminados, como barra, barra chata, barra redonda, cantoneira, chapa e viga (MME 2018).

Analisando pelo gráfico de Pareto (razão 80/20) da Figura 12, verifica-se que, dos 20 formatos de insumos, 4 formatos (20%) equivalem a 86,80% da massa total

do equipamento E1. Estes formatos são: aço-carbono em chapa, em tubo, em barra e usinado.

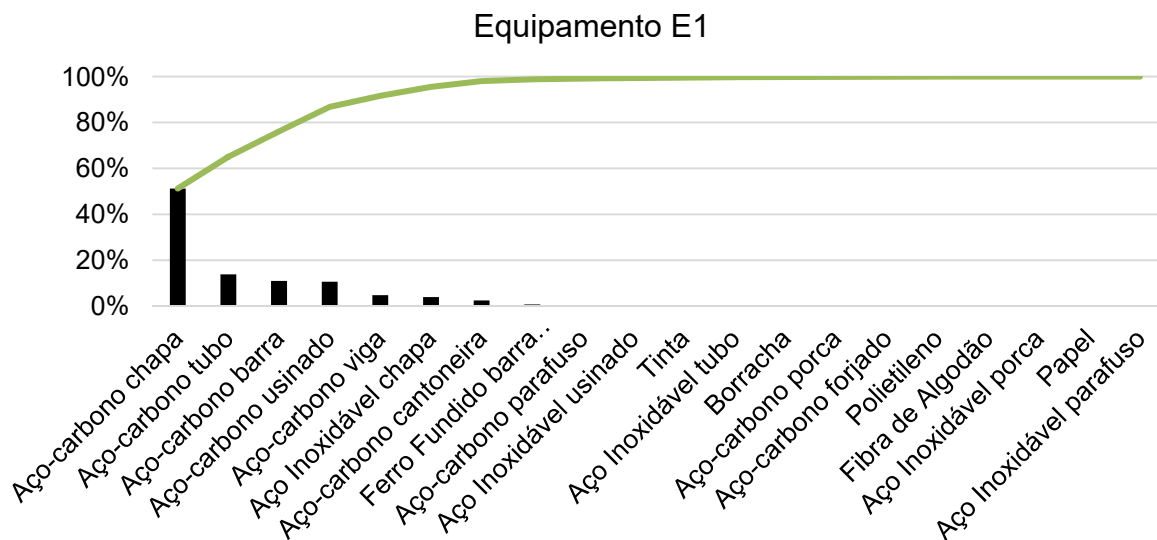


Figura 12. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E1.

Analisando pelo gráfico de Pareto (razão 80/20) da Figura 13, verifica-se que, dos 20 formatos de insumos, 4 formatos (20%) equivalem a 75,34% da massa total do equipamento E2. Estes formatos são: aço-carbono em chapa, usinado, cantoneira e em barra.

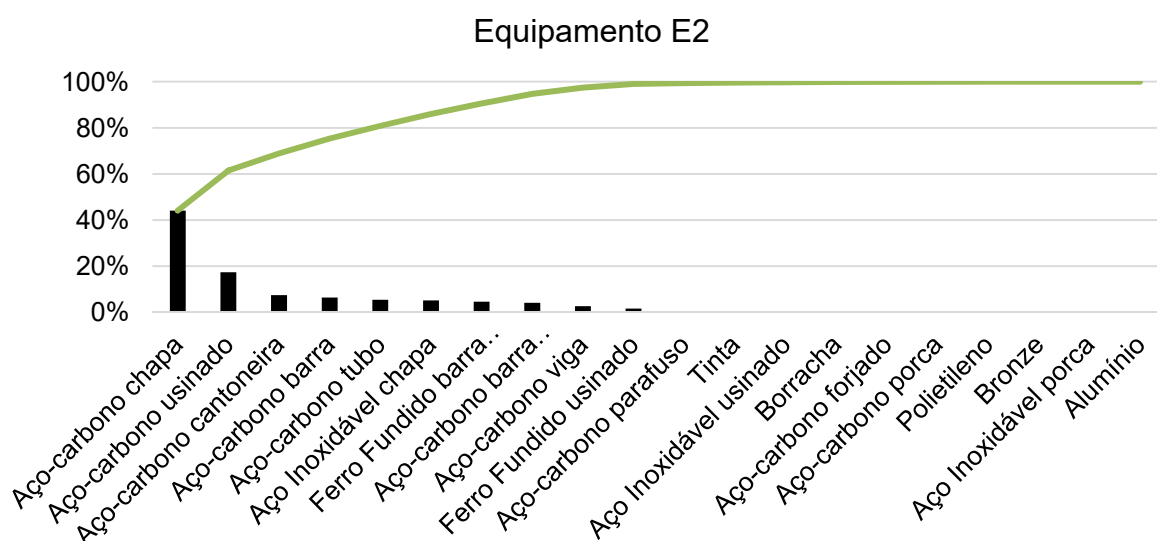


Figura 13. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E2.

Analisando pelo gráfico de Pareto (razão 80/20) da Figura 14, verifica-se que, dos 20 formatos de insumos, 4 formatos (20%) equivalem a 85,11% da massa total do equipamento E3. Estes formatos são: aço-carbono em chapa, em barra, usinado e em tubo.

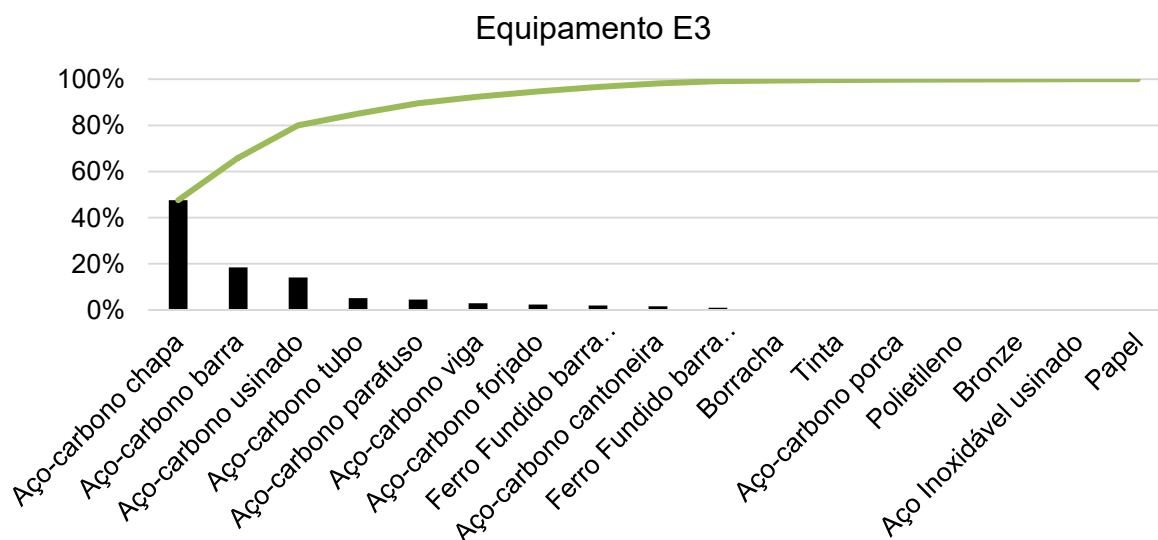


Figura 14. Gráfico de Pareto do formato do insumo do equipamento E3.

Com os dados da Tabela 8 (índice de energia incorporada MJ) e da Tabela 10 (fator de emissão CO₂e), por meio das equações 3 e 4, e utilizando a Tabela 12, calculou-se a energia incorporada e a emissão de CO₂e do equipamento E1 (Tabela 17).

Tabela 17. Valores de kg CO₂e e MJ do equipamento E1 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E1	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	45.998,65	697.910,61
Aço Inoxidável	4.009,98	53.336,01
Alumínio	-	-
Borracha	45,72	1.462,02
Bronze	-	-
Ferro Fundido	228,15	4.336,12
Papel	0,51	9,52
Polietileno	5,39	230,74
Fibra de Algodão	11,84	249,72
Tinta	117,48	2.244,00
TOTAL	50.417,72	759.778,74

No equipamento E1, o material aço-carbono representa 94,60% da massa total, e apesar de o fator de emissão e índice de energia incorporada não serem os mais elevados entre os materiais analisados, e o material aço-carbono representa 91,24% da emissão kg CO₂e e 91,86% da energia incorporada (Tabela 18).

Tabela 18. Porcentagem de kg CO₂e e MJ do equipamento E1 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E1	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	91,24%	91,86%
Aço Inoxidável	7,95%	7,02%
Alumínio	0,00%	0,00%
Borracha	0,09%	0,19%
Bronze	0,00%	0,00%
Ferro Fundido	0,45%	0,57%
Papel	0,00%	0,00%
Polietileno	0,01%	0,03%
Fibra de Algodão	0,02%	0,03%
Tinta	0,23%	0,30%
TOTAL	100 %	100 %

Com os dados da Tabela 8 (energia incorporada) e da Tabela 10 (fator de emissão CO₂e), por meio das equações 3 e 4 e utilizando a Tabela 12, calculam-se a energia incorporada e a emissão de CO₂e do equipamento E2 (Tabela 19).

Tabela 19. Valores de kg CO₂e e MJ do equipamento E2 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E2	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	35.229,52	534.516,83
Aço Inoxidável	4.036,04	53.682,60
Alumínio	0,45	6,54
Borracha	38,70	1.237,77
Bronze	7,10	142,30
Ferro Fundido	1.489,17	28.302,00
Papel	-	-
Polietileno	3,49	149,58
Fibra de Algodão	-	-
Tinta	106,80	2.040,00
TOTAL	40.911,27	620.077,62

No equipamento E2, o material aço-carbono representa 88,17% da massa total, apesar de o fator de emissão e índice de energia incorporada não serem os mais elevados entre os materiais analisados, e o material aço-carbono representa 86,11% da emissão kg CO₂e e 86,20% da energia incorporada (Tabela 21).

Tabela 20. Porcentagem de kg CO₂e e MJ do equipamento E2 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E2	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	86,11%	86,20%
Aço Inoxidável	9,87%	8,66%
Alumínio	0,00%	0,00%
Borracha	0,09%	0,20%
Bronze	0,02%	0,02%
Ferro Fundido	3,64%	4,56%
Papel	0,00%	0,00%
Polietileno	0,01%	0,02%
Fibra de Algodão	0,00%	0,00%
Tinta	0,26%	0,33%
TOTAL	100 %	100 %

Com os dados da Tabela 8 (energia incorporada) e da Tabela 10 (fator de emissão CO₂e), por meio das equações 3 e 4 e utilizando a Tabela 12, calculam-se a energia incorporada e a emissão de CO₂e do equipamento E3 (Tabela 21).

Tabela 21. Valores de kg CO₂e e MJ do equipamento E3 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E3	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	150.436,90	2.282.490,85
Aço Inoxidável	147,40	1.960,55
Alumínio	-	-
Borracha	462,32	14.785,60
Bronze	171,21	3.432,00
Ferro Fundido	2.646,14	50.290,51
Papel	0,66	12,37
Polietileno	97,10	4.159,43
Fibra de Algodão	-	-
Tinta	341,76	6.528,00
TOTAL	154.303,49	2.363.659,32

No equipamento E3, o material aço-carbono representa 96,44% da massa total, apesar de o fator de emissão e índice de energia incorporada não serem os mais elevados entre os materiais analisados, e o material aço-carbono representa 97,49% da emissão kg CO₂e e 96,57% da energia incorporada (Tabela 23).

Tabela 22. Porcentagem de kg CO₂e e MJ do equipamento E3 (tipo de material).

Material	EQUIPAMENTO E3	
	kg CO ₂ e	MJ
Aço-Carbono	97,49%	96,57%
Aço Inoxidável	0,10%	0,08%
Alumínio	-	-
Borracha	0,30%	0,63%
Bronze	0,11%	0,15%
Ferro Fundido	1,71%	2,13%
Papel	0,00%	0,00%
Polietileno	0,06%	0,18%
Fibra de Algodão	-	-
Tinta	0,22%	0,28%
TOTAL	100 %	100 %

Como os valores de kg CO₂e e MJ referentes ao material aço-carbono são mais relevantes que os demais: E1 91,24% e 91,86%; E2 86,11% e 86,20%; E3 97,49% e 96,57%, respectivamente, comprova-se a necessidade de analisar adequadamente a utilização deste material no projeto dimensional dos equipamentos, porque atualmente não existe material para substituir o aço-carbono nos projetos dos equipamentos analisados.

Deve-se ter prioridade para analisar os projetos dos equipamentos, para verificar os cálculos estruturais e os fatores de segurança utilizados. Com isso, podem-se reduzir certas dimensões dos componentes, conseqüentemente reduzindo a utilização de matéria-prima. Pelos fundamentos da Produção mais Limpa, conseguem-se a redução de custos com matérias-primas, com insumos e com energia, e a redução dos encargos ambientais causados pela atividade industrial.

Após análise do projeto estrutural dos componentes, pode ocorrer redução das dimensões dos componentes, principalmente dos componentes fabricados com aço-carbono, e conseqüentemente se reduz o consumo de energia, um dos pilares do ecodesign.

Segundo Hammond e Jones (2008), o índice de energia incorporada e o fator de emissão, referente ao aço-carbono, somente dizem respeito ao processo de fabricação de laminação a quente (sem mencionar a espessura do produto laminado), e o processo de laminação é o processo secundário para obtenção de chapas (todo material metálico obtém-se pelo processo primário de siderurgia). O processo de laminação ocorre por meio de rolos laminadores, necessitando de vários passos até obter a espessura desejada, pois quanto mais passos, maior poderá ser o índice de energia incorporada e o fator de emissão.

Analisando os processos de fabricação dos componentes, na Tabela 23, observam-se os tempos dos processos de fabricação de cada equipamento. Estes tempos incluem tempo de operação, de "setup", de espera, de movimentação e de manutenção. Notam-se valores elevados para os processos de usinagem e para os processos de soldagem. Os valores elevados para o processo de soldagem devem-se à grande utilização de chapa metálica (Tabela 16).

Tabela 23. Tempo de cada processo de fabricação.

Processo	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
	Tempo (h)		
Corte (a laser)	35,09	37,23	81,26
Corte (a plasma)	0,00	5,95	0,94
Corte (guilhotina)	2,18	2,73	26,70
Corte (serra)	33,01	10,20	15,40
Dobramento	25,50	0,15	11,66
Soldagem	156,28	23,66	326,89
Usinagem	150,49	215,02	149,98
Montagem	21,53	9,94	99,70
Pintura	6,25	8,00	19,71
TOTAL	430,33	312,88	732,24

Na Tabela 24, observam-se as proporções dos tempos de processo de fabricação de cada operação. Nota-se que o processo de usinagem é superior no equipamento E2, evidenciado pelo gráfico de Pareto (Figura 13), onde o aço-carbono usinado é o segundo formato mais empregado.

Tabela 24. Proporção do tempo de cada processo de fabricação.

Processo	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
	Tempo (h)		
Corte (a laser)	8,15%	11,90%	11,10%
Corte (a plasma)	0,00%	1,90%	0,13%
Corte (guilhotina)	0,51%	0,87%	3,65%
Corte (serra)	7,67%	3,26%	2,10%
Dobramento	5,93%	0,05%	1,59%
Soldagem	36,32%	7,56%	44,64%
Usinagem	34,97%	68,72%	20,48%
Montagem	5,00%	3,18%	13,62%
Pintura	1,45%	2,56%	2,69%
TOTAL	100 %	100 %	100 %

Observam-se, na Tabela 24, valores elevados dos tempos de usinagem, por meio dos processos de torneamento, fresamento e furação. O processo de

usinagem caracteriza-se pela formação de cavaco, por meio de ferramenta de corte (Ferraresi, 1977). Os processos de usinagem, além do consumo de energia, emitem muita transferência de calor ao meio ambiente.

Para fabricação de barra, cantoneira, viga, tubo, parafuso e porca, existem outros processos de fabricação. Por exemplo, para fabricação de tubulação, existe o processo de extrusão, calandragem e soldagem. Pode-se afirmar que os índices de energia incorporada e os fatores de emissão podem ser maiores que os utilizados, porque não se pode considerar a energia incorporada e o fator de emissão de chapa metálica semelhante à energia incorporada, e o fator de emissão de eixo de mesmo material, em função de sua massa (kg). Para fabricar o eixo, necessita-se de usinagem e normalmente tratamento térmico, desnecessário na utilização de chapa, onde, às vezes, necessita-se realizar furações, dobramento e soldagem. Outro exemplo, os rolamentos são fabricados com o material aço inoxidável, existindo muitos processos mecânicos para obter-se o produto acabado; portanto, deve-se estimar o valor de energia elétrica (kWh) necessária para sua fabricação.

Com os valores dos tempos dos processos de fabricação, calculam-se as emissões (kg CO₂e) e as energias incorporadas (MJ) referentes ao homem/hora e energia elétrica consumida para cada equipamento.

Na Tabela 25, têm-se os valores de kg CO₂e e MJ referentes aos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E1. O fator de emissão total é 51.922,31 kg de CO₂e e a energia incorporada total é 810.098,37 MJ.

Tabela 25. Total de kg CO₂e e MJ do equipamento E1.

EQUIPAMENTO E1	kg CO ₂ e	MJ
insumos	50.417,72	759.778,74
homem/hora (h)	240,55	1.230,75
energia elétrica (kWh)	1.264,04	49.088,88
TOTAL	51.922,31	810.098,37

Na Figura 15, observam-se as proporções dos fatores de emissão (kg CO₂e) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E1. Verifica-se que os fatores de emissão do homem-hora e da energia elétrica são relativamente baixos: 0,46% e 2,43%, respectivamente.

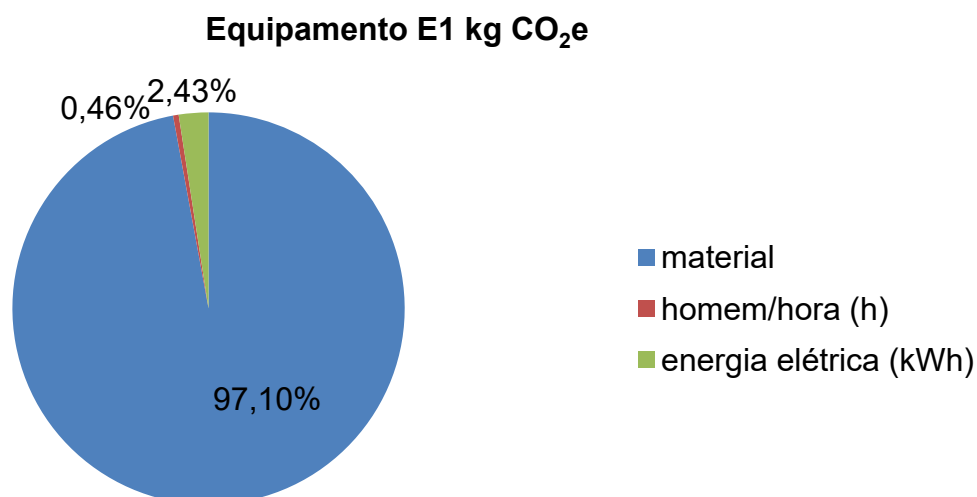


Figura 15. Total % do fator de emissão (kg CO₂e) do equipamento E1.

Na Figura 16, observam-se as proporções das energias incorporadas (MJ) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E1. Verifica-se que a energia incorporada do homem-hora (0,15%) é relativamente baixa; mas a energia incorporada da energia elétrica tem valor relevante: 6,06%.

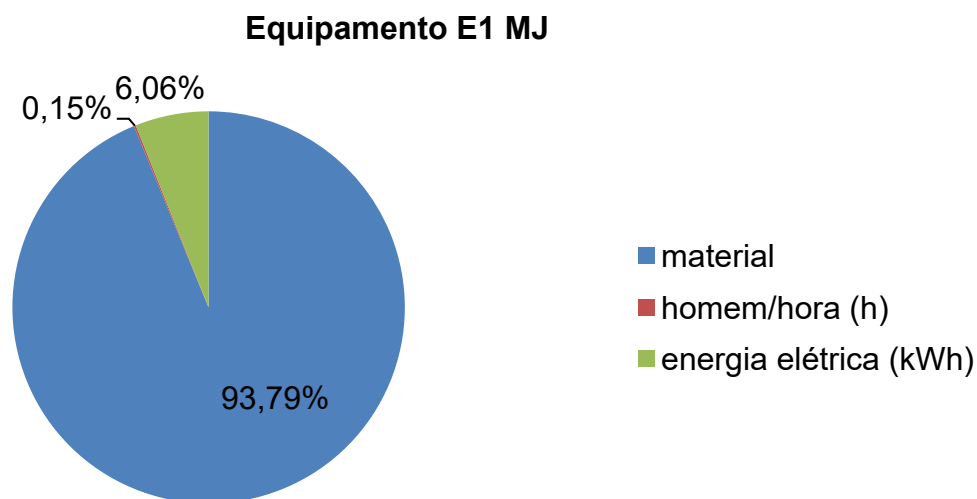


Figura 16. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E1.

Na Tabela 26, têm-se os valores de kg CO₂e e MJ referentes aos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E2. O fator de emissão

total é 42.280,82 kg de CO₂e, e a energia incorporada total é 667.366,73 MJ. Nota-se que estes valores são inferiores aos do equipamento E2. O equipamento E2 tem 78,48% da massa do equipamento E1.

Tabela 26. Total de kg CO₂e e MJ do equipamento E2.

EQUIPAMENTO E2	kg CO ₂ e	MJ
insumos	40.911,27	620.077,62
homem/hora (h)	174,90	894,83
energia elétrica (kWh)	1.194,65	46.394,28
TOTAL	42.280,82	667.366,73

Na Figura 17, observam-se as proporções dos fatores de emissão (kg CO₂e) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E2. Verifica-se que os fatores de emissão do homem-hora e da energia elétrica são relativamente baixos: 0,41% e 2,83%, respectivamente.

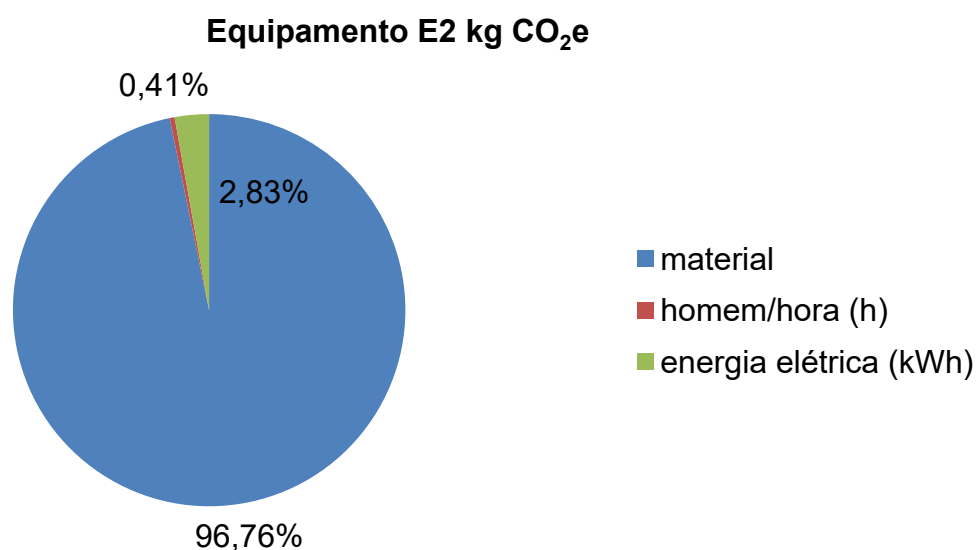


Figura 17. Total % do fator de emissão (kg CO₂e) do equipamento E2.

Na Figura 18, observam-se as proporções das energias incorporadas (MJ) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E2. Verifica-se que a energia incorporada do homem-hora (0,13%) é relativamente baixa; mas a energia incorporada da energia elétrica tem valor relevante: 6,95%.

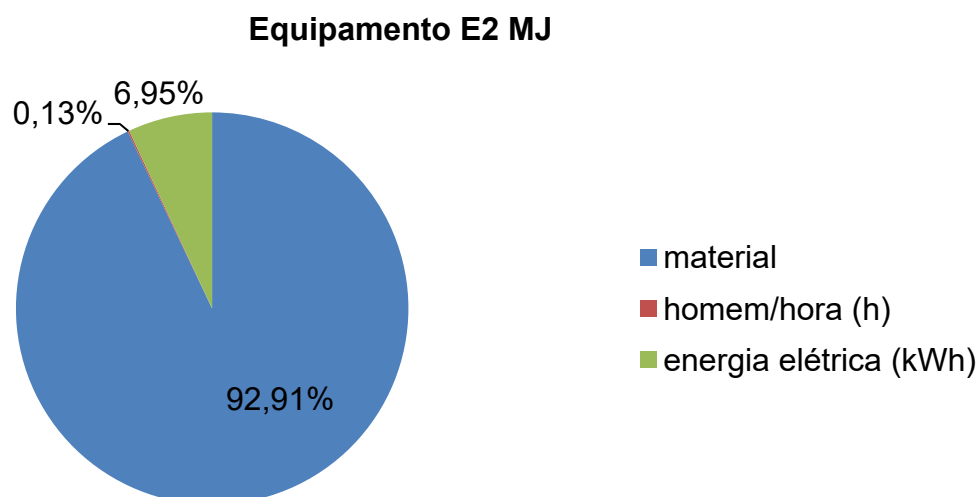


Figura 18. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E2.

Na Tabela 27, têm-se os valores de kg CO₂e e MJ referentes aos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E3. O fator de emissão total é 156.596,83 kg de CO₂e, e a energia incorporada total é 2.438.919,20 MJ. Nota-se que estes valores são superiores aos dos equipamentos E1 e E2, devido à massa do equipamento E3 ser a maior (30.980 kg).

Tabela 27. Total de kg CO₂e e MJ do equipamento E3.

EQUIPAMENTO E3	kg CO ₂ e	MJ
insumos	154.303,49	2.363.659,32
homem/hora (h)	409,32	2.094,20
energia elétrica (kWh)	1.884,02	73.165,68
TOTAL	156.596,83	2.438.919,20

Na Figura 19, observam-se as proporções dos fatores de emissão (kg CO₂e) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E3. Verifica-se que os fatores de emissão do homem/hora e da energia elétrica são relativamente baixos: 0,26% e 1,20%, respectivamente.

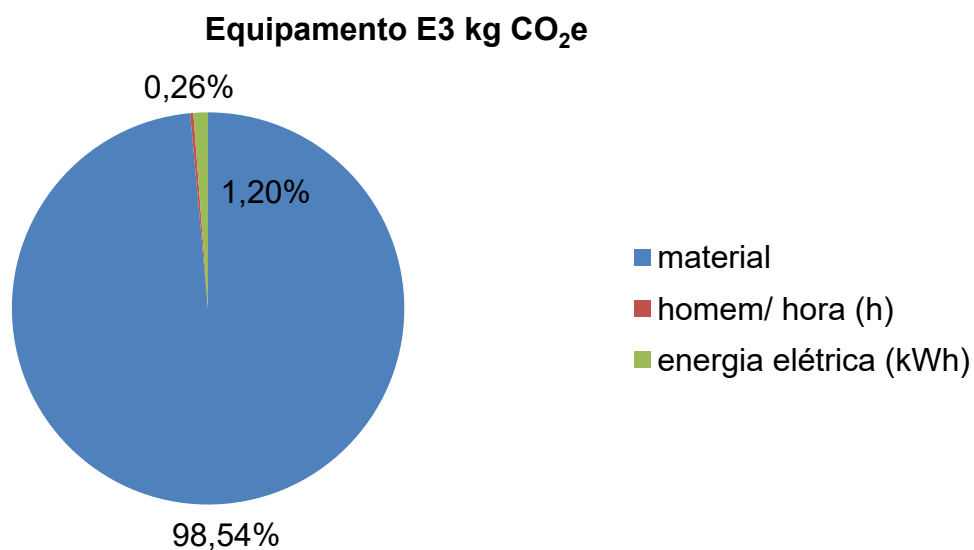


Figura 19. Total % do fator de emissão (kg CO₂e) do equipamento E3.

Na Figura 20, observam-se as proporções das energias incorporadas (MJ) dos insumos (material, homem/hora e energia elétrica) do equipamento E3. Verifica-se que a energia incorporada do homem/hora (0,09%) é relativamente baixa; a energia incorporada da energia elétrica (3,00%) não tem valor relevante como nos equipamentos E1 e E2.

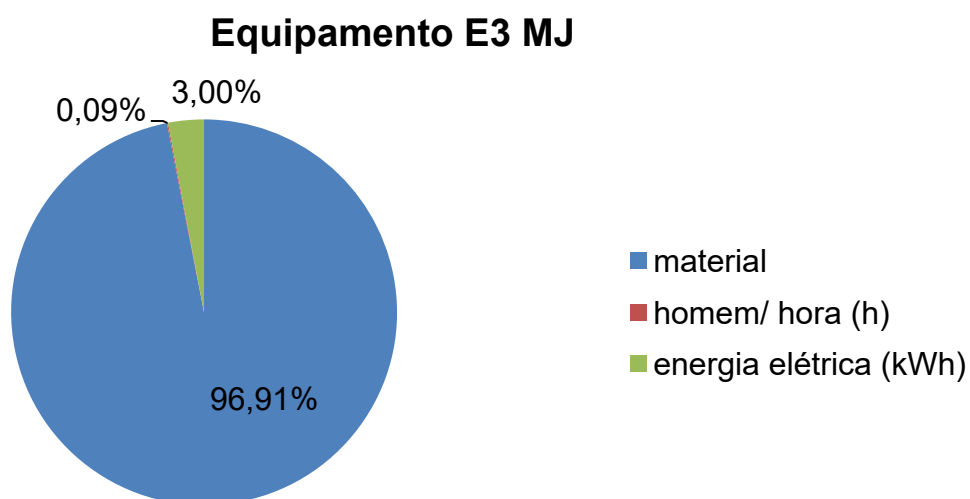


Figura 20. Total % da energia incorporada (MJ) do equipamento E3.

Na Tabela 28, tem-se o comparativo dos três equipamentos e observam-se os valores elevados de energia incorporada e a emissão de CO₂e referentes aos materiais.

Tabela 28. Comparativo da proporção de kg CO₂e e MJ dos equipamentos.

	EQUIPAMENTO					
	E1		E2		E3	
	kg CO ₂ e	MJ	kg CO ₂ e	MJ	kg CO ₂ e	MJ
material	97,10%	93,79%	96,76%	92,91%	98,54%	96,91%
homem/hora (h)	0,46%	0,15%	0,41%	0,13%	0,26%	0,09%
energia elétrica	2,43%	6,06%	2,83%	6,95%	1,20%	3,00%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Nos três equipamentos, a energia elétrica é relevante para o cálculo de energia incorporada, mas para emissão de CO₂e não é relevante. Notam-se valores próximos dos equipamentos E1 e E2.

De acordo com Tavares (2006), o consumo de energia dos equipamentos corresponde a 0,27% da energia incorporada nos materiais de construção civil, enquanto os desperdícios podem somar até 25%.

Observa-se que os valores referentes ao homem/hora são mínimos, devido ao baixo valor de energia incorporada (25,2 MJ dia⁻¹), bem como ao baixo fator de emissão (4,7 kg CO₂ dia⁻¹) (Heller et al., 2018).

Para análise dos insumos que mais impactam nos cálculos de fatores de emissão e de energia incorporada, mostram-se na Tabela 29 os materiais metálicos ferrosos e a energia incorporada. Observa-se a importância dos metais ferrosos e a energia elétrica consumida, valores superiores a 98,73%, sugerindo-se utilizar estes dois parâmetros para cálculo (sem precisão) de kg CO₂e e MJ.

Tabela 29. Importância dos metais ferrosos e da energia elétrica na proporção de kg CO₂e e MJ dos equipamentos.

	EQUIPAMENTO					
	E1		E2		E3	
	kg CO ₂ e	MJ	kg CO ₂ e	MJ	kg CO ₂ e	MJ
Metal ferroso	96,75%	93,27%	96,39%	92,38%	97,85%	95,73%
Energia elétrica	2,43%	6,06%	2,83%	6,95%	1,20%	3,00%
TOTAL	99,19%	99,33%	99,22%	99,33%	99,05%	98,73%

Para os cálculos de emissão de CO₂e e de energia incorporada, para estes três equipamentos, podem-se considerar somente os metais ferrosos e a energia elétrica consumida, simplificando os cálculos e obtendo-se valores próximos, se se considerar todos os insumos.

A Tabela 30 descreve os valores obtidos de emissão de CO₂e e energia incorporada dos três equipamentos.

Tabela 30. Valores de emissão de CO₂e e energia incorporada dos três equipamentos.

	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
kg CO ₂ e	51.922,31	42.280,82	156.596,83
MJ	810.098,37	667.366,73	2.438.919,20
Massa (kg)	7.900,00	6.200,00	30.980,00

Para análise dos valores de emissão de CO₂e e de energia incorporada, dividem-se os valores obtidos pela massa do equipamento (Tabela 31).

Tabela 31. Valores de CO₂e kg⁻¹ e MJ kg⁻¹ dos três equipamentos.

	EQUIPAMENTO		
	E1	E2	E3
CO ₂ e kg ⁻¹	6,57	6,82	5,05
MJ kg ⁻¹	102,54	107,64	78,73

No presente trabalho, o equipamento E1 obteve emissão de 6,57 CO₂e kg⁻¹ e energia incorporada de 102,54 MJ kg⁻¹; e o equipamento E2, 6,82 CO₂e kg⁻¹ e 107,64 MJ kg⁻¹; o equipamento E3, 5,05 CO₂e kg⁻¹ e 78,73 MJ kg⁻¹.

Mantoam et al. (2016), analisando tratores, obtiveram valores de 3,3 a 5,7 CO₂e kg⁻¹ e 71,9 a 122,7 MJ kg⁻¹, cujo equipamento é impulsionado por motor de combustão interna, sendo a massa de material ferro fundido superior à de aço-carbono.

Na Tabela 13, há a porcentagem de cada insumo na composição da massa dos equipamentos, e verifica-se que o aço-carbono tem 94,60%, 88,17% e 96,44% da massa total dos equipamentos E1, E2 e E3, respectivamente. Na Tabela 8, há o índice de energia incorporada para aço-carbono de 48,40 MJ kg⁻¹, sendo este valor inferior aos valores da Tabela 31, sugerindo que existe sobra de material.

Referente ao fator de emissão de CO₂e (Tabela 10), 3,19 CO₂e kg⁻¹ refere-se ao aço-carbono, valor inferior das energias incorporadas da Tabela 31, também sugerindo sobra de material.

Neste trabalho, os valores calculados dos equipamentos são elevados devido à utilização de grande quantidade de chapa metálica, havendo muitas sobras de retalhos de chapas, havendo também necessidade de muitos processos de usinagem e gerando muito cavaco.

Verifica-se que os materiais ferrosos (aço-carbono, aço inoxidável e ferro fundido) são os componentes que mais influenciam nos cálculos de energia incorporada e na emissão de GEE. Conforme observado na Tabela 15, realiza-se classificação dos materiais ferrosos utilizados em função de seu formato ou da utilização.

Para o cálculo completo do impacto ambiental na fabricação destes equipamentos, deve-se calcular também a transferência de calor por condução, convecção e radiação gerado nos processos de fabricação.

Na operação de corte a laser, o valor calculado de transferência de calor por convecção é muito reduzido, porque a área de atuação do feixe é reduzida, mas existe o aquecimento da chapa, aumentando a taxa de transferência de calor ao meio ambiente, e parcela significativa dos 90% da potência instalada é convertida em energia térmica.

O mesmo raciocínio deve ser realizado para as demais operações de fabricação, principalmente para os processos de usinagem, tais como torneamento,

fresamento e furação, porque os tempos de operação são elevados. A quantidade de calor produzida no processo de usinagem é elevada (Figura 4).

A temperatura média do corpo humano é 37 °C, portanto o trabalhador emite calor por convecção, porque a temperatura média no local de trabalho não é superior a 37 °C. Existem outros fatores relativos à temperatura para considerar, mas são informações de difícil obtenção.

Os valores reais de kg CO₂e e MJ para os equipamentos podem ser superiores, porque existem muitos parâmetros e informações necessários para calcular com exatidão. Muitas informações são desconhecidas, porque desde o início da cadeia de suprimentos (“Supply Chain”) devem-se realizar os cálculos, e algumas empresas desconhecem o assunto. Além disso, muitas empresas não fornecem todas as informações.

Encontraram-se poucos trabalhos para o cálculo de energia incorporada e da emissão de GEE de equipamentos agrícolas, e os valores de energia incorporada e os fatores de emissão estão defasados, e poucos trabalhos consideram a energia elétrica consumida.

5 CONCLUSÃO

Os materiais ferrosos (aço-carbono, aço inoxidável e ferro fundido) são os tipos de material que mais influenciam os cálculos de energia incorporada MJ e da emissão de GEE CO₂e, sendo o material aço-carbono o mais importante.

Verifica-se a viabilidade custo-benefício, para alterar os tipos de material dos componentes com as maiores massas. Existem especificações de materiais metálicos que possuem maior resistência mecânica. Por exemplo, a adição do elemento químico nióbio ou boro ao aço-carbono aumenta a resistência mecânica, reduzindo a massa necessária do componente mecânico.

Importante reavaliar os cálculos estruturais e os fatores de segurança dos projetos dos componentes de aço-carbono, objetivando reduzir a massa necessária destes componentes.

A parcela referente ao trabalho humano contribui pouco para o cálculo da energia incorporada e da emissão de GEE, mas a energia elétrica consumida nos processos de fabricação é relevante.

Devem-se avaliar os processos de fabricação, reduzindo os tempos, reduzindo o consumo de energia elétrica e também reduzindo o material descartado, por exemplo, cavacos.

REFERÊNCIAS

Ablat MA, Qattani A (2018) Finite Element Analysis of Origami-Based Sheet Metal Folding Process. **Journal of Engineering Materials and Technology** 140: p.031008.

Ahanchian M, Biona JBM (2014) Energy demand, emissions forecasts and mitigation strategies modeled over a medium-range horizon: The case of the land transportation sector in Metro Manila. **Energy Policy** 66: 615-629.

Álvares Jr OM, Linke RRA (2002) **Metodologia Simplificada de Cálculo das Emissões de Gases do Efeito Estufa de Frotas de Veículos no Brasil** - CETESB. São Paulo.

Amato Neto J (1985) **A indústria de máquinas agrícolas no Brasil**: origens e evolução. Revista de Administração de Empresas. São Paulo, v. 25, n. 3, p. 57-69.

ANP (2018) **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2018**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/images/central-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/2018/anuario-2018-versao-impressao.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2013). **NBR 16229**: Sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro, 5p.

Barnes RM (1977) **Estudo de movimentos e de tempos**: projeto e medida do trabalho. 6.ed. São Paulo: Edgard Blücher.

Barth H, Melin M (2018) A Green Lean approach to global competition and climate change in the agricultural sector - A Swedish case study. **Journal of Cleaner Production** 204: 183-192.

Beardsworth SJ (2018) Renewable Energy Special Issue: Going for Green!. **Chemistry - A European Journal** 24(69): 18.134-18.136.

Berge B (2009) **The ecology of building materials**. Oxford: ELSEVIER, 2.ed. 427p.

Boustead I, Hancock GF (1979) **Handbook of industrial energy analysis**. Chichester: Ellis Horwood Publ., 422p.

Bresciani Filho E (1988) **Seleção de materiais metálicos**. 2.ed. Campinas: Editora da UNICAMP.

Bresciani Filho et al. (1986) **Conformação plástica dos metais**. 3.ed. Campinas, Editora da UNICAMP.

Caldera HTS, Desha C, Dawes L (2017) Exploring the role of lean thinking in sustainable business practice: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production** 167: 1.546-1.565.

Callister WD, Rethwisch DG (2013) **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC.

Çengel YA, Boles MA (2013). **Termodinâmica**. 7.ed. Porto Alegre: Bookman.

Chiarini, A (2014) Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers. **Journal of Cleaner Production** 85: 226-233.

Cline A, LeMay S, Helms MM (2015) A framework for reverse logistics: the case of post-consumer carpet in the US. **International Journal of Commerce and Management** 25: 466-489.

Cui H, Zhou K (2018) Industrial power load scheduling considering demand response. **Journal of Cleaner Production** 204: 447-460.

De Beer JG, Worrell E, Blok K (1998) Future technologies for energy efficient iron and steelmaking. **Annual Review of Energy and Environment**. Palo Alto, 23: 123-205.

Destouni G, Frank H (2010) Renewable Energy. **AMBIO** 39:18-21.

Dias MAP (2012) **Logística, transporte e infraestrutura**: armazenagem, operador logístico, gestão via TI, multimodal. São Paulo: Atlas.

Diniz AE, Marcondes FC, Coppini NL (1999) **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo, MM Editora.

FAO (2014) **Aumentam as emissões de gases com efeito estufa provenientes da agricultura**. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/pt/item/224454/icode/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

Farias LM, Sellitto MA (2011) **Uso da energia ao longo da história**: evolução e perspectivas futuras. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun.

Fator médio - Inventários corporativos (2018) Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 28 out. 2018.

Ferraresi D (1977) **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: EDGARD BLÜCHER.

Fluck RC, Baird CD (1980) **Agricultural energetics**. Westport: AVI Publ., 192p.

Forestry for a low-carbon future (2016) Disponível em: <www.fao.org/3/a-i5857e.pdf>. Acesso em: 17 set. 2017.

França R (2014) **Um novo fim para a sucata**. Exame, São Paulo, n. 11, 1067.ed., p. 102-105, jun.

Garza-Reyes JA, Romero JT, Govindan K, Cherrafid A, Ramanathan U (2018) A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping (E-VSM). **Journal of Cleaner Production** 180: 335-348.

GHG Protocol (2018) **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol**. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/arquivos.gvces.com.br/arquivos_ghg/152/especificacoes_pb_ghgprotocol.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.

Goldemberg J, Lucon O (2012) **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

Gonçalves OS (2010) **Administração de Materiais**. 3.ed. Rio de Janeiro: Elsevier.

Guimarães LBM (2006) A Ecologia no projeto de Produto: design sustentável, design verde, ecodesign. **Ergonomia de Produto**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2: 5-35.

Halliday D, Resnick R, Walker J (2018) **Fundamentos de física**, volume 1: mecânica. 10.ed. Rio de Janeiro: LTC.

Hammond G, Jones C (2008) **Inventory of carbon & energy**: Bath: University of Bath, Department of Mechanical Engineering, Sustainable Energy Research Team, 64p.

Hanaoka T, Akashib O, Fujiwarac K, Motokic Y, Hibino G (2014) Potential for reducing air-pollutants while achieving 2 °C global temperature change limit target. **Environmental Pollution** 195: 336-343.

Hart SL, Milstein MB (1999) Global Sustainability and the Creative Destruction of Industries. **Sloan Management Review**. 41: 23-33. Disponível em: <<https://sloanreview.mit.edu/article/global-sustainability-and-the-creative-destruction-of-industries/>>. Acesso em: 11 out. 2018.

Heller MC, Willits-Smith A, Meyer R, Keoleian GA, Rose D (2018) Greenhouse gas emissions and energy use associated with production of individual self-selected US diets. **Environmental Research Letters** 13: 044.004.

Hémery Daniel, Bebie JC, Deléage JP (2018) **Uma História da Energia**. Disponível em: <<http://abnt.org.br/paginampe/biblioteca/files/upload/anexos/pdf/4ee5b810af4a3aee073ab89f0a573a1a.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2018.

IEA (2009) **Transport, Energy and CO₂**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

IEA (2011) **World energy outlook 2011**. Paris, 659p.

IEA (2018) **Key World Energy Statistics 2018**. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2291?filename=key_world_2018.pdf>.

Acesso em: 09 out. 2018.

Iniciativa Verde (2018) Disponível em: <<http://www.iniciativaverde.org.br/calculadora/index.php#calculadora>>. Acesso em: 29 set. 2018.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019.

Kalpakjian S (1995) **Manufacturing engineering and technology**. 3.ed. New York: Addison-Wesley Publishing Co.

Kimming M, Sundberg C, Nordberg Å, Baky A, Bernesson S, Hansson PA (2015) Replacing fossil energy for organic milk production - potential biomass sources and greenhouse gas emission reductions. **Journal of Cleaner Production** 106: 400-407.

Kroos KA, Potter MC (2015) **Termodinâmica para Engenheiros**. São Paulo: CENGAGE LEARNING.

Kureski R, Moreira VR, Veiga CP (2016) Assessment of the Economic Structure of Brazilian Agribusiness. **The Scientific World Journal** 2016: 1-10.

Leite PR (2009) **Logística Reversa**: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

Lemos ADC (1998) **A Produção mais Limpa como geradora de inovação e competitividade**: o caso da fazenda Cerro do Tigre. Dissertação (mestrado). Departamento de Administração, UFRGS. Porto Alegre.

Liker JK (2005) **O Modelo Toyota**: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Porto Alegre: Bookman.

Macedônio AC, Picchioni SA (1985) **Metodologia para cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária**. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura, Depto. de Economia Rural, 95p.

Machado AR, Abrão AM, Coelho RT, da Silva MB (2015) **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher.

Mantoam EJ, Romanelli TL, Gimenez LM (2016) Energy demand and greenhouse gases emissions in the life cycle of tractors. **Biosystems Engineering** 151: 158-170.

Martins PG, Laugeni FP (2005) **Administração da produção**. 2.ed. São Paulo: Saraiva.

Meio Ambiente (2012) **Entenda como funciona o mercado de crédito de carbono**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

Ministério de Minas e Energia (2018) **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico**. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Ministério de Minas e Energia (2019) **Balanço Energético Nacional 2018**: relatório síntese ano base 2018. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Ministério do Meio Ambiente (2017) **Ecodesign**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/7654-ecodesign>>. Acesso em: 1º nov. 2017.

Ministério do Meio Ambiente (2018) **Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/emiss%C3%B5es-de-gee>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

Molion LCB (2008) **Aquecimento global**: uma visão crítica. São Paulo: Associação Brasileira de Climatologia (ABClimate), Rev. Bras. Climatologia. v. 4, n. 3 e 4, p.07-24.

Moran MJ. et al. (2013) **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC.

Mosen C, Weinert N (2015) Process chain evaluation for an overall optimization of energy efficiency in manufacturing - The welding case. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** 34: 44-51.

Mott RL (2015) **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. 5.ed. São Paulo: Pearson.

National Research Council (2011) **Climate stabilization targets: emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia**. Washington: National Academic Press, 286p.

Norton RL (2013) **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman.

Ohno T (1997) **O Sistema Toyota de Produção – Além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman.

Oliveira JFG, Alves SM (2007) **Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental**. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 129-138, jan./abr.

Parthiban A, Ravikumar R, Abdul Zubar H, Duraiselvam M (2014) Experimental investigation of CO2 laser cutting on AISI 316L sheet. **Journal of Scientific & Industrial Research** 73: 387-393.

Pedroso GM (2015) **Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de Sistemas de Vedação de Habitações**. 226f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - UNB, Brasília.

Reficco E, Gutiérrez R, Jaén MH, Auletta N (2018) Collaboration mechanisms for sustainable innovation. **Journal of Cleaner Production** 203: 1.170-1.186.

Rivera JL, Lallmahomed A (2016) Environmental implications of planned obsolescence and product lifetime: a literature review. **International Journal of Sustainable Engineering** 9: 119-129.

Royston S, Selby J, Shove E (2018) Invisible energy policies: A new agenda for energy demand reduction. **Energy Policy** 123: 127-135.

Sandler T (2017) Environmental cooperation: contrasting international environmental agreements. **Oxford Economic Papers** 69(2): 345-364.

SEEG (2018) **Contexto**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/contexto/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

Serra GE, Heezen AM, Moreira JR, Goldemberg J (1979) **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, 86p.

Sharma A, Yadava V (2018) Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – A review. **Optics and Laser Technology** 98: 264-280.

Simons D, Zokaei K (2005) Application of lean paradigm in red meat processing. **British Food Journal** 107:4: 192-211.

Singer S F (2003) Letter to the Editor. **Science** 301: 595-596.

Singh D, Chattopadhyaya S (2015) Numerical and Infrared Mapping of Temperature in Heat Affected Zone during Plasma Arc Cutting of Mild Steel. **International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering** 9: 1375-1380.

Slack N et al. (2018) **Administração da produção**. 8.ed. São Paulo: ATLAS.

Souza EG, Milanez LF (1996) Conservação de energia no uso de tratores na agricultura. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 19, 1996, Piracicaba. Anais... Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, p. 712-726.

Sposto RM, Paulsen JS (2014) Energia Incorporada em Habitações de Interesse Social na Fase de Pré-uso: o caso do Programa Minha Casa Minha Vida no Brasil. **Oculum Ensaios** 1: 39-50.

Tavares V, Lacerda N, Freire F (2019) Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The “Moby” case study. **Journal of Cleaner Production** 212: 1.044-1.053.

Tavares SF (2006) **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 225f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis.

Tercio R (2002) **Eficiência energética de um sistema eólico isolado**. UNICAMP, Campinas: 2002. Disponível em <<https://www.feagri.unicamp.br/energia/agreener2002/jdownloads/pdf/0100.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

Transportes 2017 (2017) **Anuário Estatístico de Transportes**. Disponível em: <http://www.infraestrutura.gov.br/images/BIT_TESTE/Publica%C3%A7oes/Transportes_2017.pdf>. Acesso em: 15 maio 2019.

Transportes 2018 (2018) **Anuário Estatístico de Transportes**. Disponível em: <http://www.infraestrutura.gov.br/images/BIT_TESTE/Publica%C3%A7oes/Transportes_2018.pdf>. Acesso em: 15 maio 2019.

Trent EM (1991) **Metal Cutting**. 3.ed. England: BUTTERWORTH HEINEMANN.

Valor Econômico (2017) **Preço do carbono tem de saltar para cumprir acordo do clima**. Disponível em: <<https://www.valor.com.br/internacional/4984338/preco-do-carbono-tem-de-saltar-para-cumprir-acordo-do-climadiz-estudo>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

Veiga JPS, Romanelli TL, Gimenez LM, Busato P, Milan M (2015) Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p.471-477.

Womack JP, Jones DT, Roos D (1990) **Machine that Changed the World**. Simon and Schuster.

Yu CM (2004) **Sequestro de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume.