

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Maria Helena de Sousa

ANÁLISE E DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO ENVOLVENDO OS VETORES ENERGIA  
ELÉTRICA E GÁS NATURAL EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Recife

2018

Maria Helena de Sousa

ANÁLISE E DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO ENVOLVENDO OS VETORES  
ENERGIA ELÉTRICA E GÁS NATURAL EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Dissertação apresentada como requisito complementar para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração em Processos e Sistemas Térmicos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco

Orientador: Prof. Dr. Jorge R. Henríquez Guerrero  
Co-orientador: Prof. Dr. Flávio A. Bueno Figueiredo

Recife  
2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S725a

Sousa, Maria Helena de.

Análise e diagnóstico energético envolvendo os vetores energia elétrica e gás natural em uma indústria automotiva / Maria Helena de Sousa - 2018.  
110folhas, Il.; Tab. e Nom.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte. Henríquez Guerrero.  
Coorientador: Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Curso de Engenharia Mecânica, 2018.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Eficiência energética. 3. Consumo de gás natural. 4. Consumo de energia elétrica. 5. Indústria automotiva. I. Henríquez Guerrero, Jorge Recarte(Orientador). II. Figueiredo, Flávio Augusto Bueno(Coorientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-255

7 de março de 2018

“ANÁLISE E DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO ENVOLVENDO OS VETORES  
ENERGIA ELÉTRICA E GÁS NATURAL EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA”

MARIA HELENA DE SOUSA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. FLAVIO AUGUSTO BUENO FIGUEIREDO  
CO-ORIENTADOR

---

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

---

Prof. Dr. FLAVIO AUGUSTO BUENO FIGUEIREDO (UFPE)

---

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)

---

Prof. Dr. RÔMULO SIMÕES CEZAR MENEZES (UFPE)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Jorge Guerrero e Prof. Flavio Figueiredo, pela paciência, disponibilidade, compreensão, e principalmente, por todo o conhecimento compartilhado.

Aos Professores João Brito e Rômulo Menezes pelo auxílio na correção deste trabalho.

À FCA Latam pelos dados disponibilizados sem os quais este estudo não aconteceria.

Aos meus pais, Marcos Williams e Mônica Maria, pelo amor incondicional e incentivo constante nos momentos de dúvida e desânimo. Às minhas irmãs, Maria Alice e Maria Clara, por ouvirem minhas lamúrias.

À Diego Ribeiro pela calma, dedicação e carinho.

À Roberto Soares, Renato Mateus, Tiago Trapp, Filipe Silva e Diego Cavalcante, pela valiosa ajuda para a execução deste trabalho e à todos os colegas da Jeep, em especial à equipe de Utilidades, pelo encorajamento e apoio.

*“São as nossas escolhas, Harry,  
que revelam o que realmente somos,  
muito mais do que as nossas qualidades.”*

J.K.Rowling

## RESUMO

Este trabalho apresenta o diagnóstico energético realizado em uma indústria automotiva localizada no nordeste do Brasil baseando-se na metodologia da norma ISO 50001. A partir do estudo dos vetores primários em 2016, verificou-se que energia elétrica e gás natural são responsáveis por 68,3% e 23,8% do consumo, respectivamente. Entre os vetores secundários, destaca-se a água gelada, com uma parcela de 79,5%. Constatou-se que a produção é a variável que afeta diretamente o desempenho energético, o qual foi de 5,15 GJ/carro para o período analisado. A Pintura foi a área que apresentou maior participação no consumo (54,5%), sendo, então, alvo de aprofundamento para sugestões de melhoria nos três primeiros meses de 2017. Foram analisados os consumos de energia elétrica, gás natural, ar comprimido e água gelada e identificadas oportunidades de melhoria. Entre as oportunidades estão modificações no processo para melhor aproveitamento da energia térmica residual disponível. Estas mudanças foram simuladas no software EBSILON®Professional. A modificação que apresentou maior benefício foi o conjunto turbina a gás, chiller de absorção e trocador de calor para aquecimento de água. Mesmo não tendo todas as sugestões executadas, as linhas de tendência de consumo na Pintura antes e depois da realização do diagnóstico energético evidenciaram a redução do consumo fixo para os dois principais vetores (energia elétrica e gás natural).

Palavras chave: Eficiência energética. Consumo de gás natural. Consumo de energia elétrica. Indústria automotiva.

## ABSTRACT

This study presents the energy diagnosis performed in an automotive industry located in the northeast of Brazil based on ISO 50001 methodology. From the analysis of the primary vectors in 2016, it was verified that electric energy and natural gas account for 68.3% and 23.8% of consumption, respectively. Among the secondary vectors, the cold water stands out, with a share of 79.5%. Production was considered the variable that directly affects the energy performance, which was 5.15 GJ/car for the analyzed period. The Paint shop was the area that had the largest share of consumption (54.5%) and was therefore the focus of a more detailed study for suggestions for improvement in the first three months of 2017. The consumption of electric energy, natural gas, compressed air and cold water and opportunities of improvement were identified. Among the opportunities there are modifications in the process to better exploit the residual thermal energy available. These changes were simulated in the software EBSILON® Professional. The most beneficial modification was the use of gas turbine, absorption chiller and heat exchanger for water heating. Despite not having all the suggestions performed, the consumption trend lines in the Paint shop before and after the realization of the energy diagnosis indicated the reduction of the fixed consumption for the two main vectors (electric energy and natural gas).

**Key words:** Energy efficiency. Natural gas consumption. Electric energy consumption. Automotive industry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Emissões antropogênicas de gases de efeito estufa no mundo por setor econômico em 2010. A sigla AFOLU significa “Agriculture, Forestry and Other Land Use”. .....	14
Figura 2- Oferta de energia primária no mundo por fonte em 1973 (a) e 2015 (b).....	15
Figura 3- Consumo de energia no mundo entre 1990 e 2040. ....	15
Figura 4- Consumo final de energia no mundo por setor econômico.....	16
Figura 5- Os múltiplos benefícios da eficiência energética: uma abordagem múltipla revela todos os impactos positivos possíveis. ....	25
Figura 6- Oferta interna de energia no Brasil em 2016.....	26
Figura 7- Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2016 .....	27
Figura 8- Consumo final de energia no Brasil por setor em 2016.....	27
Figura 9- Evolução da demanda total de energia no Brasil por fonte até 2050.....	28
Figura 10- Evolução da demanda total de energia no Brasil por setor até 2050. ....	28
Figura 11- Indústria: consumo final energético por fonte (%). ....	29
Figura 12- Metodologia da norma ISO 50001. ....	32
Figura 13- Distribuição do uso de energia elétrica e combustível na indústria dos Estados Unidos. ....	33
Figura 14- Caracterização de tecnologias de recuperação de energia térmica residual.....	36
Figura 15- Economizador usado para pré-aquecer o ar de combustão. ....	37
Figura 16- Princípio de operação de um recuperador em edifícios. ....	38
Figura 17- Sistema simples de refrigeração por absorção. ....	39
Figura 18- Sistema de refrigeração de absorção de duplo efeito: (a) Fluxo em série (b) Fluxo paralelo (c) Fluxo reverso paralelo. ....	41
Figura 19- Sistema de geração pura de eletricidade em ciclo a vapor (à esquerda) e sistema de geração combinada de calor e eletricidade – cogeração (à direita). ....	44
Figura 20- Balanço térmico típico de planta de geração pura, em ciclo a vapor (à esquerda) e balanço térmico de uma planta semelhante, com sistema de cogeração agregado (à direita)..	44
Figura 21- Turbina a gás simples.....	46
Figura 22- Produção de veículos em 2016 para os maiores grupos do setor. ....	47
Figura 23- Produção de veículos motores no Brasil entre 1981 e 2016. Estão inclusos carros e veículos comerciais. ....	49
Figura 24- Consumo específico de energia para grupos da indústria automotiva em 2014, 2015 e 2016. ....	49

Figura 25- Consumo de energia no processo de Pintura.....	51
Figura 26- Localização do município de Goiana em Pernambuco.....	53
Figura 27- Fluxo do processo de fabricação do automóvel.....	53
Figura 28- Layout da fábrica estudada: 1) Prensas; 2) Funilaria; 3) Pintura; 4) Montagem; 5) Energy Center; 6) Centro administrativo .....	54
Figura 29- Bobina de aço sendo cortada. ....	54
Figura 30- Aplicação de pontos de solda em uma das linhas da Funilaria. ....	55
Figura 31- Etapa de cataforese na Pintura.....	55
Figura 32- Vetores primários e secundários da planta em estudo. ....	56
Figura 33- Centro de utilidades (Energy center) e pipe racks. ....	58
Figura 34- Estágios do pré-tratamento na Pintura .....	63
Figura 35- Aquecedor de água na Pintura.....	64
Figura 36- Consumo de energia (TJ) e produção na Pintura entre janeiro e março de 2017... ..	66
Figura 37- Custo com energia (R\$/000) e produção na Pintura entre janeiro e março de 2017 .....	67
Figura 38- Consumo de energia elétrica da Pintura em relação à produção .....	67
Figura 39- Consumo de energia elétrica na Pintura durante o dia.....	68
Figura 40- Consumo de gás natural da Pintura em relação à produção.....	69
Figura 41- Carga térmica no circuito de água quente da Pintura .....	70
Figura 42- Consumo de água gelada da Pintura em relação à produção .....	71
Figura 43- Consumo de ar comprimido da Pintura em relação à produção.....	71
Figura 44- Simulação do aquecedor de água da Pintura.....	76
Figura 45- Simulação do aquecedor de água da Pintura na situação inicial .....	78
Figura 46- Simulação das alterações do sistema de aquecimento de água (a) com a correção do excesso de ar, (b) utilização dos gases do aquecedor para pré-aquecimento e (c) utilização dos gases do forno ED para pré-aquecimento. ....	78
Figura 47- Simulação de turbina a gás Saturn 20 .....	81
Figura 48- Simulação da turbina a gás com aquecimento do circuito de água .....	84
Figura 49- Adaptação do circuito de água quente para utilização de chiller de absorção .....	85
Figura 50- Simulação do chiller de absorção de simples efeito nas condições nominais.....	87
Figura 51- Adaptação do circuito de água quente para utilização de chiller de absorção com a turbina a gás.....	90
Figura 52- Simulação do chiller de absorção de duplo efeito .....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Boas práticas energéticas para o setor industrial.....	34
Tabela 2- Características de sistemas a LiBr-H <sub>2</sub> O para temperaturas de refrigeração entre 5°C e 10°C.....	42
Tabela 3- Componentes típicos de um sistema de cogeração .....	45
Tabela 4- Estatísticas de produção de veículos em 2016.....	48
Tabela 5- Distribuição do uso de energia na fabricação de automóveis.....	50
Tabela 6- Características do gás natural entregue pela Copergás.....	57
Tabela 7- Consumo de vetores primários em 2016 .....	59
Tabela 8- Consumo de energia elétrica e gás natural para produção de água gelada, ar comprimido, água quente e água de resfriamento em 2016 .....	59
Tabela 9- Consumo de energia por área em 2016 .....	60
Tabela 10- Distribuição do consumo de vetores secundários .....	60
Tabela 11- Distribuição do consumo de gás natural em 2016.....	61
Tabela 12- Indicadores de desempenho por área em 2016 .....	61
Tabela 13- Distribuição do consumo de energia elétrica na Pintura .....	69
Tabela 14- Distribuição do consumo de gás natural na Pintura .....	70
Tabela 15- Fornos da Pintura e respectivas vazões e temperaturas dos gases de exaustão .....	73
Tabela 16- Condições de simulação do aquecedor de água .....	79
Tabela 17- Resultado das simulações no aquecedor de água.....	80
Tabela 18- Parâmetros da turbina Saturn 20 para operação nominal .....	81
Tabela 19- Resultado da simulação da turbina a gás para as condições da Pintura .....	83
Tabela 20- Parâmetros de entrada na simulação do chiller de absorção de simples efeito.....	86
Tabela 21- Resultado da simulação do chiller de simples efeito.....	89
Tabela 22- Parâmetros de entrada da simulação do chiller de absorção de duplo efeito.....	90
Tabela 23- Resultado da simulação do chiller de duplo efeito na Pintura .....	92
Tabela 24- Cálculo do ganho anual com as modificações sugeridas.....	95

## NOMENCLATURA

H	Entalpia	[kJ/kg]
S	Entropia	[kJ/kg.K]
T	Temperatura	[°C]
$\dot{m}$	Fluxo mássico	[kg/s]
$\dot{Q}$	Fluxo de calor	[kW]
W	Potência	[kW]
p	Pressão	[bar]
COP	Coefficiente de desempenho	[-]
$\eta$	Eficiência	[-]
x	Concentração de refrigerante	[-]
PCI	Poder calorífico inferior	[kcal/m <sup>3</sup> ]
LiBr	Brometo de lítio	
H <sub>2</sub> O	Água	
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico	
IEA	Agência Internacional de Energia	
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.	
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	
ISO	Organização Internacional de Normalização	
FCA	Fiat Chrysler Automobiles	
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco	
COPERGÁS	Companhia Pernambucana de Gás	

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.2	ESTRUTURA.....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
3.1	CONCEITO DE ENERGIA.....	22
3.1.1	Primeira lei da termodinâmica .....	23
3.1.2	Eficiência Energética .....	24
3.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL .....	26
3.3	GESTÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA .....	31
3.4	OPORTUNIDADES DE MELHORIA .....	33
3.4.1	Recuperação de energia .....	35
3.4.2	Cogeração .....	43
3.5	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA .....	46
<b>4</b>	<b>DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO .....</b>	<b>52</b>
4.1	ANÁLISE DOS USOS E CONSUMOS DE ENERGIA.....	56
4.1.1	Energy Center.....	57
4.1.2	Dados de consumo.....	58
4.2	ÁREAS SIGNIFICATIVAS.....	61
4.3	PINTURA .....	62
4.3.1	Vetores energéticos da Pintura.....	66
4.4	IDENTIFICAR, PRIORIZAR E REGISTRAR OPORTUNIDADES DE MELHORIA.....	72
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE RECUPERAÇÃO DE CALOR E COGERAÇÃO.....</b>	<b>74</b>
5.1	SOFTWARE: EBSILON®PROFESSIONAL .....	74
5.2	MODIFICAÇÕES NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA .....	75
5.3	TURBINA A GÁS .....	80
5.4	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÉRMICOS COMO FONTE DE ENERGIA PARA CHILLERS DE ABSORÇÃO.....	84
5.4.1	Água quente como fonte de energia .....	84
5.4.2	Gases de exaustão da turbina como fonte de energia .....	89

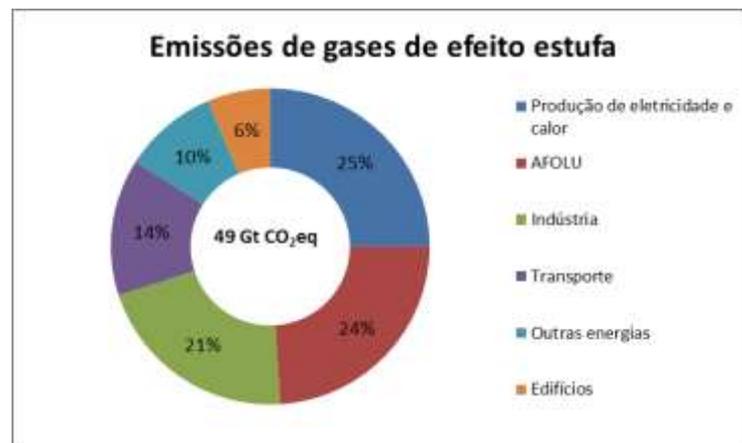
<b>6</b>	<b>BENEFÍCIOS .....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As consequências do aquecimento global, causado pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE), já são perceptíveis (NASA, 2017), sendo alvos constantes de discussão internacional (UN, 2017). O aumento da temperatura média terrestre, a elevação do nível dos oceanos, a redução das calotas polares, a maior incidência de doenças tropicais e a diminuição da biodiversidade são alguns exemplos.

Verificando os setores responsáveis pelas emissões de GEE no ano de 2010 (Figura 1), é possível perceber que a produção de eletricidade e calor é responsável por 25% do total.

Figura 1- Emissões antropogênicas de gases de efeito estufa no mundo por setor econômico em 2010. A sigla AFOLU significa “Agriculture, Forestry and Other Land Use”.



Fonte: Adaptado de IPCC (2014)

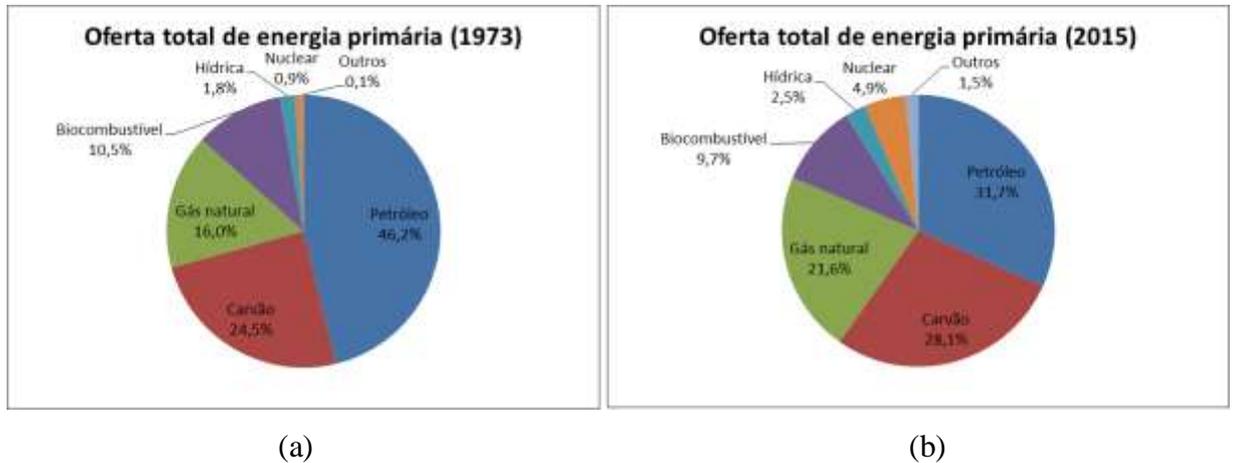
Entre 1973 e 2015, houve um leve aumento na participação de fontes alternativas na matriz energética mundial (Figura 2). Entretanto, os combustíveis fósseis ainda representam um percentual alto, correspondendo a mais de 80% da matriz.

Além disso, o rápido desenvolvimento tecnológico faz com que haja um crescente consumo de energia. Entre 2015 e 2040, este número deverá crescer 28%, sendo o aumento mais significativo nos países fora da OCDE (Figura 3).

Segundo Godoi (2011), a geração de energia a partir das fontes solar, eólica, biomassa, maremotriz e ondomotriz apresentam vantagens sob o ponto de vista socioambiental, porém, por serem fontes difusas e intermitentes, apenas o seu uso não supriria o consumo crescente da população, sendo ainda necessário o emprego dos combustíveis fósseis. Logo, é imprescindível que sejam implementadas políticas de diversificação da matriz energética mundial. Adicionalmente, ações no ponto de uso conseguiriam diminuir a taxa de crescimento

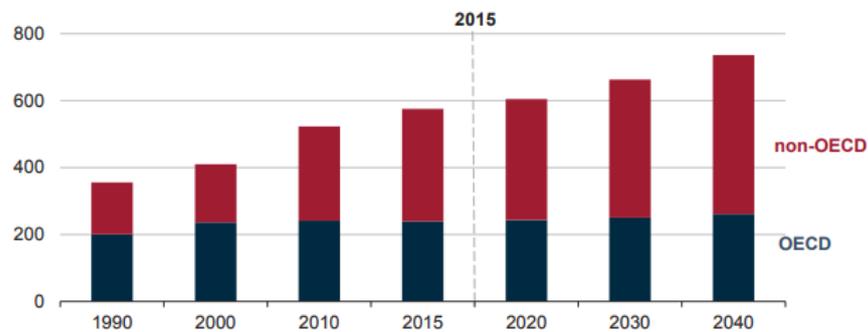
de consumo prevista para as próximas décadas e, conseqüentemente, mitigar os impactos causados por novas usinas geradoras.

Figura 2- Oferta de energia primária no mundo por fonte em 1973 (a) e 2015 (b).



Fonte: Adaptado de IEA (2017)

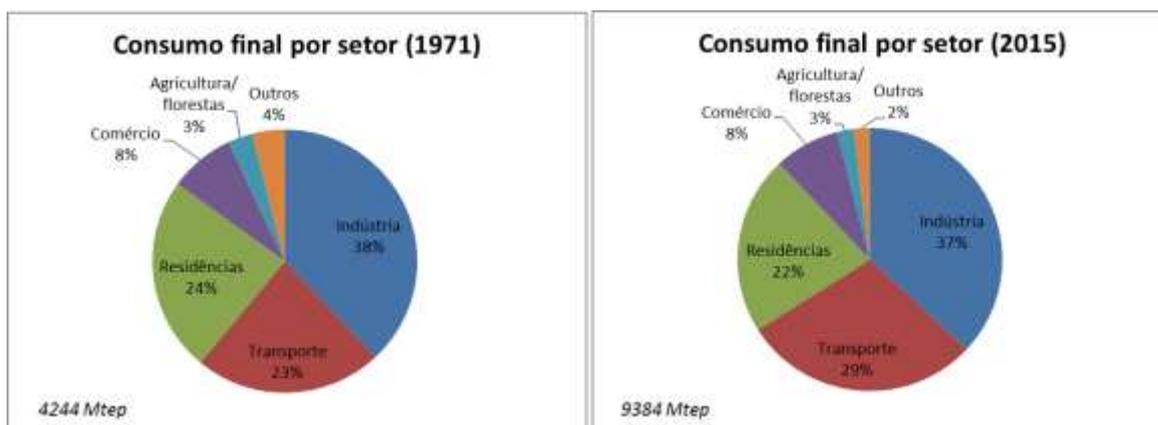
Figura 3- Consumo de energia no mundo entre 1990 e 2040.



Fonte: EIA (2017)

O principal usuário de energia no mundo é o setor industrial, como se pode ver na Figura 4. Apesar do aumento no consumo entre 1971 e 2015, a sua participação se manteve praticamente constante: mais de um terço do total.

Figura 4- Consumo final de energia no mundo por setor econômico.



Fonte: Adaptado de IEA (2017c)

Neste cenário, a eficiência energética apresenta-se como a solução para manter as taxas de consumo de energia estáveis sem interferir na qualidade de vida da população nem no desenvolvimento industrial de países emergentes. Em 2016, por exemplo, o mundo teria usado 12% de energia a mais se não fossem pelas melhorias em eficiência energética que vêm sendo executadas desde 2000 (IEA, 2017b). Além dos benefícios ambientais, a eficiência energética também traz vantagens para as companhias, reduzindo custos e aumentando sua competitividade no mercado.

No Brasil, a indústria automotiva vem enfrentando as consequências do difícil quadro econômico. Apesar de ter mostrado crescimento na produção em 2017 em relação ao ano anterior, ainda apresenta um déficit de mais de um milhão de unidades em relação a 2013 (ANFAVEA, 2017). Uma das formas de reduzir custos mantendo a qualidade do produto, cujo público é bastante exigente (OICA, 2015), seria explorar o potencial existente de eficiência energética.

Políticas de eficiência energética voltadas para o setor industrial já existem em diversos países, cada uma delas com sua particularidade de acordo com região, tipo de indústria e cenário econômico (TANAKA, 2011). A Agência Internacional de Energia destaca duas principais razões para o aumento da eficiência energética na indústria nos últimos anos: a primeira seria a instalação de novas unidades, principalmente em países em desenvolvimento, as quais já nascem mais eficientes que as demais. O outro fator seria a implementação de sistemas de gestão de energia (SGE), os quais possibilitam o monitoramento do consumo de energia e a identificação de oportunidades de melhoria (IEA, 2017b). A ISO 50001 é uma das ferramentas que podem ser utilizadas na implantação de um sistema e destaca-se por fornecer os meios de verificar a conformidade do mesmo.

Tanto Schulze *et al.* (2015) quanto a norma ISO 50001 sugerem como uma das etapas iniciais da implementação de um SGE um diagnóstico (também chamado de avaliação ou auditoria) para entendimento dos fluxos de energia da companhia. A partir do diagnóstico, é possível identificar onde ocorrem as perdas no perímetro estudado e executar ações que resultam em redução de emissões e de custos.

No caso de uma fábrica automotiva, a sua complexidade e variedade de vetores oferecem inúmeras oportunidades, principalmente no seu setor de maior consumo, a Pintura, onde há potencial de aproveitamento dos resíduos térmicos inerentes a este processo.

Considerando a necessidade de assegurar o fornecimento de energia nas próximas décadas, reduzir os impactos ambientais e sociais, recuperar a competitividade da indústria automobilística brasileira e valorizar o tema da eficiência energética, pretende-se contribuir através da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) na realização destas pautas.

Este trabalho apresenta um diagnóstico energético baseado nas diretrizes da norma ISO 50001 realizado nas instalações de uma planta automobilística localizada no estado de Pernambuco. Considerando que a fábrica fora inaugurada em 2015, foi utilizado o ano de 2016 como referência para a análise e com base nesta, foram sugeridas ações para a área de Pintura. Entre as ações estão o aproveitamento da energia térmica residual existente no local para aquecimento de água, a instalação de uma turbina a gás para geração distribuída e a instalação de um chiller de absorção para produção de água gelada. Foi utilizado o software EBSILON®Professional para avaliação da efetividade destas modificações.

Por se tratar de uma planta nova e com alto nível de automação, entende-se que o projeto servirá como base para outras montadoras ou indústrias com perfil semelhante de consumo.

## 1.1 OBJETIVOS

Realizar um diagnóstico energético de acordo com o que sugere a norma ISO 50001 numa fábrica automotiva em Pernambuco é o objetivo principal deste estudo. Para tanto, foi analisado o comportamento de consumo da fábrica no ano de 2017, com base em 2016, e em seguida sugeridas possíveis melhorias para o local.

Os objetivos específicos foram:

- a) Estudar o estado da técnica e os conceitos dentro do tema da gestão de energia e da eficiência energética na indústria;
- b) Realizar diagnóstico energético de uma indústria automotiva ao se:
  1. Analisar usos e consumos de energia de uma fábrica automotiva;

2. Identificar vetores energéticos e áreas significativas de consumo e
  3. Identificar oportunidades de melhoria.
- c) Sugerir o uso de sistemas de aproveitamento de energia residual térmica para os setores de maior consumo de energia;
  - d) Realizar simulação para análise energética dos sistemas sugeridos no item c e
  - e) Demonstrar benefícios econômicos das melhorias sugeridas.

## 1.2 ESTRUTURA

O trabalho foi dividido em oito capítulos. No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema do estudo, incluindo objetivos e estrutura do texto.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, que apresenta as mais recentes publicações na área de gestão de energia no ambiente industrial, com ênfase para os trabalhos na indústria automotiva. Em seguida, no capítulo 3, são revisados os conceitos de energia e de eficiência energética, relacionando-os com a primeira lei da termodinâmica. São mostrados também o panorama brasileiro e a relação entre a gestão de energia e o setor industrial, além de uma gama de melhorias que podem ser aplicadas, especialmente por meio da recuperação de energia térmica residual.

O diagnóstico energético é apresentado no capítulo 4, onde é descrita a fábrica estudada assim como consumo, vetores e áreas significativas da mesma. A Pintura recebe especial ênfase por ter alta participação no consumo. Neste capítulo também são sugeridas as melhorias para redução de custos com base no consumo verificado. No capítulo 5 são descritos os modelos desenvolvidos para simulação de modificações no processo da Pintura, a fim de melhorar o desempenho energético do processo. Os modelos foram desenvolvidos no software EBSILON®Professional, e seguem três principais aplicações: modificação do sistema de aquecimento de água, implantação de uma turbina a gás e implantação de um chiller de absorção (de simples e de duplo efeito).

A análise dos benefícios econômicos que poderiam ser alcançados com a implantação das otimizações sugeridas é mostrada no capítulo 6. Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros. Como complemento, o capítulo 8 apresenta detalhes das referências usadas na elaboração deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos anos 1990 já era possível encontrar autores defendendo a importância da conservação da energia na economia global. Lovins (1990) afirmava que, usando a tecnologia disponível na época, seria possível economizar três quartos de toda a eletricidade consumida. No Brasil, Salazar (1992) analisou os primeiros programas de conservação de energia do PROCEL (criado em 1986) e propôs uma reavaliação dos mesmos, de modo a torná-los “mais ágeis, econômicos e motivadores”.

Na década seguinte, diagnósticos energéticos para identificação de oportunidades de melhoria no ambiente industrial foram realizados por diversos autores. A Eletrobrás, em 2009, sugeriu uma metodologia para execução do diagnóstico energético, que seria composta basicamente por levantamento de custos e análise de onde e quando a energia está sendo consumida. Esta metodologia se assemelha às utilizadas por Silva (2001), Santos *et al.* (2005), Fernandes (2010) e Kabir *et al.* (2010).

A partir de 2011, os trabalhos na área usaram principalmente a ISO 50001 como referência para realização do diagnóstico energético. Mathias (2014) e Oliveira (2015) realizaram trabalhos parecidos: ambos descreveram primeiro os processos da organização e como a bibliografia recomenda que melhorias sejam realizadas. Em seguida, coletaram os dados de consumo da planta e sugeriram modificações.

Mathias (2014) realizou o diagnóstico energético de uma indústria petroquímica. A planta avaliada foi fundada em 1972 e possuía equipamentos antigos que poderiam ser substituídos. Ele analisou os sistemas de ar comprimido, água de resfriamento, fornos e seus queimadores, geração e distribuição de vapor e torres de destilação. O autor estimou um potencial técnico de economia de 36,4% por meio de *benchmarking* com outras plantas do grupo. Entre as principais oportunidades de ganho identificadas estavam a recuperação de energia térmica no pré-aquecimento da água das caldeiras do processo, diminuição da infiltração de ar e ajuste dos queimadores dos fornos de pirólise de nafta.

Oliveira (2015) analisou uma indústria de lubrificantes. O autor coletou dados de consumo e tarifação da empresa e os dividiu em iluminação, condicionadores de ar, chuveiros elétricos, eletrodomésticos, ventilação, bombas, compressores de ar, motores elétricos e aquecimento de fluido. Um dos obstáculos encontrados, segundo ele, foi a necessidade de envolvimento dos funcionários na execução dos projetos de melhoria. Para que isto ocorresse, seriam necessários envolvimento e comprometimento dos gestores, treinamentos e

comunicação interna, itens citados na ISO 50001. O autor afirma que o ganho econômico na empresa poderia chegar a 40%, caso todas as sugestões dadas fossem realizadas.

Na indústria automobilística é possível identificar estudos visando a eficiência energética em diversas abordagens: simulações prévias do design das linhas de produção (Fysikopoulos *et al.*, 2012; Damrath *et al.*, 2016), modificações no sistema de automação e controle (Carvalho e Gomes, 2015), melhoria na qualidade da pintura (Wang *et al.*, 2009), redução de tempo de ciclo em linhas automáticas (Nilakantan *et al.*, 2015) e otimização do consumo de água (Schlei-Peters *et al.*, 2015).

A gestão de energia foi tema dos trabalhos de Gordic *et al.* (2010), Wiemes e Pawlowski (2013), Dongellini *et al.* (2014), Bottcher e Muller (2014), Castro (2015) e Franz *et al.* (2017).

Gordic *et al.* (2010) realizaram o trabalho numa planta automotiva na Sérvia, implantando um sistema de gestão de energia. As ações foram divididas em cinco principais vertentes: Política de gerenciamento de energia, definição do time de trabalho, motivação dos colaboradores, sistema de medição e monitoramento, conscientização e treinamentos e investimentos. O indicador adotado foi de consumo de energia elétrica por carro produzido, que na época era de 2MWh/carro (7,2 GJ/carro). As medições utilizadas para o diagnóstico foram mensais e não foram divididas por área. Foram sugeridas 10 atividades, englobando ar comprimido, gás natural, eletricidade e água potável, com até 3 anos de tempo de retorno.

Esta análise é semelhante à realizada por Castro (2015) no Brasil. Diferentemente de Gordic *et al.* (2010), este tinha medições por vetor e por área da planta para realização do diagnóstico, o que possibilitou um estudo de correlação. Assim como Mathias (2014) e Oliveira (2015), o autor também utilizou a norma ISO 50001 como referência. Não foi encontrada alta correlação entre os consumos de energia elétrica das diversas áreas, visto que cada uma trabalhava de maneira individualizada e de acordo com sua própria demanda. Além disso, notou-se não haver gerenciamento adequado do consumo de energia nos períodos não produtivos.

Outros dois trabalhos relevantes são os de Wiemes e Pawlowski (2013) e Dongellini *et al.* (2014). O primeiro relata a execução de mudanças na estufa de cura da etapa de Pintura da fabricação do carro, cujos vetores envolvidos eram energia elétrica e gás natural. A metodologia adotada para o trabalho foi idealizada a partir de um *brainstorming* da equipe de trabalho da fábrica e as modificações executadas no processo foram simples: alteração do horário de start-up e implantação de portas na entrada e na saída do forno. Os ganhos foram pequenos (menos de 10% em relação aos consumos anteriores de energia e gás). Já Dongellini

*et al.* (2014) auditaram instalações italianas, concentrando-se no aquecimento dos edifícios. A otimização do sistema de climatização e de isolamento dos prédios poderia reduzir em 15% o consumo de gás natural, gerando uma economia anual da ordem de €100.000, de acordo com o modelo utilizado.

Bottcher e Muller (2014) estudaram os impactos da implantação de um sistema de gestão em fornecedores automotivos na Alemanha. Os autores concluíram que um SGE contribui de forma positiva para redução das emissões de carbono e de custos, com efeitos maiores em empresas com certificação na norma ISO 50001. Segundo eles, isto ocorre porque a preparação para a auditoria e as críticas do certificador podem ajudar a identificar e eliminar fraquezas do sistema existente. Recentemente, Franz *et al.* (2017) investigaram o estado da arte da eficiência energética e da gestão de energia no setor automotivo. O mesmo destacou que o diagnóstico energético é tipicamente o primeiro passo a ser executado.

Wang *et al.* (2009), Zahler e Iglauer (2012), Castro (2015) e Franz *et al.* (2017) identificaram a Pintura como a área de maior consumo de energia na indústria automotiva. Segundo Galitsky e Worrell (2008) este processo poderia chegar a ser responsável por 70% do consumo da planta, tendo também diversas oportunidades de aumentar sua eficiência energética. Uma delas é a recuperação de energia térmica residual, que pode tornar a instalação mais eficiente por aproveitar o que antes seria perdido. Galitsky e Worrell (2008) citam inclusive o uso de turbinas a gás e chillers de absorção como opções para redução de custos.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 CONCEITO DE ENERGIA

Segundo Hinrichs *et al.* (2010) o desenvolvimento econômico e os altos padrões de vida são processos complexos que compartilham de um denominador comum: a disponibilidade de um abastecimento adequado e confiável de energia. E o que seria energia, exatamente?

Para Hazen e Trefil (2009), energia seria a habilidade de realizar trabalho – a habilidade de exercer uma força. Este é um conceito sucinto, apresentado já durante os anos escolares. Os autores ainda diferenciam energia de potência, sendo esta a medida do quão rapidamente o trabalho é realizado.

A evolução desde conceito é feita por Goldemberg e Lucon (2008):

A ideia de energia existe desde a Antiguidade. O conceito de energia, contudo, levou muitos anos para ser desenvolvido. Isaac Newton (1642-1727) formulou as leis do movimento e definiu as energias potencial e cinética. Depois, Fahrenheit e Celsius criaram as escalas de temperatura. Tais escalas auxiliaram na medição de quantidades de calor – e longos debates se sucederam sobre sua definição. Thompson (1753-1814) conceituou a conversão de trabalho mecânico em calor. Thomas Young (1773-1829) cunhou em 1807 o termo Energia, a partir do grego *energeia* (em trabalho ou atividade) para unificar os aspectos observados. James P. Joule (1818-1889) determinou a equivalência energética entre calor, trabalho e energia elétrica (1 caloria = 4,184 joules). Planck (1858-1947) explicou os aspectos energéticos da luz. Finalmente, Albert Einstein (1879-1955) desenvolveu a teoria da relatividade, unificando todas as formas de energia e dando-lhe uma equivalência em massa.

No dia-a-dia, o termo “energia” é comumente empregado como sinônimo de eletricidade. No entanto, como se pode ver a partir das definições apresentadas, este seria apenas um tipo de energia. Têm-se ainda o que se chama de energia cinética, gravitacional, química, térmica, radiante, nuclear, etc.

A sociedade moderna se destaca pela sua rápida evolução tecnológica acompanhada de um aumento na demanda de energia, em todas as suas formas. O principal combustível das sociedades primitivas era obtido próximo ao local de uso, sendo formado essencialmente por lenha. Atualmente é quase impossível para um usuário de energia conhecer a sua origem e por quais processos passou até chegar ao seu ponto final (NOGUEIRA, 2007).

É importante não apenas pensar na energia diretamente, mas em todos os bens que dependem dela. Boa parte da energia é empregada nos produtos, especialmente os feitos de materiais como papel, alumínio, vidro e aço. Portanto, ações de reutilização e reciclagem também economizam energia.

### 3.1.1 Primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a variação total de energia contida em um sistema fechado é igual ao efeito (líquido) das interações de calor e trabalho que o sistema sofre com o meio. Em outras palavras, a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; ela pode apenas mudar de forma.

Uma ideia básica é que a energia pode ser armazenada nos sistemas sob três formas: energia interna, energia cinética e energia potencial gravitacional (MORAN *et al.*, 2014). Ela pode ser transferida de duas formas: trabalho “W” e transferência de calor “Q” (por condução, convecção e/ou radiação).

A variação da energia total de um corpo pode ser dada pela Equação 1.

$$W_{sobre} + Q_{sobre} = \Delta(EC + EP + ET) = \Delta E \quad (1)$$

em que EC, EP e ET são as energias cinética, potencial e térmica (interna) contidas em um corpo,  $W_{sobre}$  é o trabalho que está sendo realizado sobre o corpo e  $Q_{sobre}$  é o calor adicionado.

Para um sistema energético qualquer, a eficiência é dada pelo trabalho realizado (o que se deseja) dividido pela energia consumida (entrada necessária).

Considere, por exemplo, um sistema isolado. Nele, uma fonte de calor envia uma quantidade  $Q_0$  para uma máquina térmica, que por sua vez realiza trabalho (W) e descarta uma quantidade de energia (Q). Pode-se aplicar a primeira lei da termodinâmica, ou seja:

$$Q_0 = Q + W. \quad (2)$$

Neste caso, a eficiência térmica será:

$$\eta = \frac{W}{Q_0}. \quad (3)$$

É importante perceber que este indicador apenas mede a saída “útil”. O exemplo dado por Patterson (1996) é o de uma lâmpada incandescente: ela tem uma eficiência de aproximadamente 6% (apenas 6% da energia elétrica que entra é convertida em luz, com os outros 94% sendo perdidos para o meio ambiente em forma de calor).

### 3.1.2 Eficiência Energética

EPE (2010) define eficiência energética como a relação entre a quantidade de energia final utilizada e um bem produzido ou serviço realizado, que por sua vez assemelha-se ao conceito da primeira lei da termodinâmica. De forma parecida, a Agência Internacional de Energia (IEA), diz que eficiência energética é uma forma de gerenciar e restringir o aumento do consumo de energia. Algo é mais eficiente energeticamente se entrega mais produtos com a mesma entrada de energia, ou o mesmo produto com menos energia. Este conceito também é adotado por Eletrobrás (2009). Em outras palavras, a eficiência energética pressupõe a implementação de estratégias e medidas para combater o desperdício de energia ao longo do processo de transformação e ao longo da respectiva cadeia de valor. Em síntese, quando se implanta um projeto de eficiência energética o objetivo primordial é aumentar ou manter o patamar de oferta de produtos e/ou serviços, mas diminuindo a utilização de energia comparativamente a períodos anteriores (GOUVEIA, 2008).

Para Godoi (2011), eficiência energética é racionalização de energia: “ações ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos”.

Os múltiplos benefícios da eficiência energética podem ser vistos na Figura 5.

Figura 5- Os múltiplos benefícios da eficiência energética: uma abordagem múltipla revela todos os impactos positivos possíveis.



Fonte: Adaptado de IEA, 2014

Destes, apenas as reduções na oferta de energia e nas emissões de GEE foram medidas até agora. Porém, os demais são extremamente valiosos, tanto em termos econômicos quanto sociais.

No contexto industrial, especificamente, destacam-se:

1. Redução do custo de produção;
2. Melhora na reputação;
3. Melhora na qualidade do produto;
4. Melhora na operação e, conseqüentemente, menor necessidade de manutenção corretiva;
5. Redução na poluição do ar e
6. Aumento da competitividade.

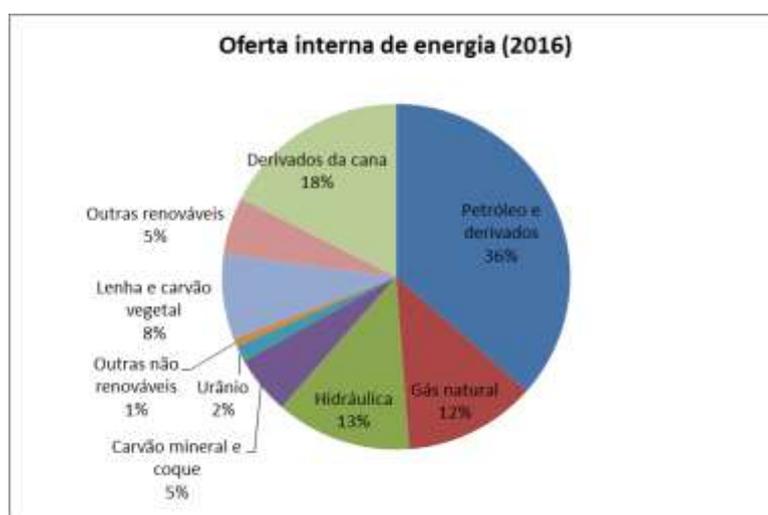
No estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria em 2009 (CNI, 2009) foram analisados 63 programas de eficiência energética industrial, desenvolvidos em 12 países e na União Europeia. Algumas das conclusões foram que 94% dos programas associam ganhos de eficiência com ganhos ambientais, 82% possuem algum tipo de incentivo financeiro ou tributário para ações de eficiência energética e 62% promovem a substituição de equipamentos e alteração de processos industriais. Ainda segundo este relatório, os principais instrumentos utilizados em experiências internacionais abrangem, entre outros, reduções tributárias, capacitação de pessoal e custeio, total ou parcial, de diagnósticos energéticos.

### 3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL

O Brasil possui uma reserva vasta de fontes renováveis e fósseis. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) divulgado em 2017, o percentual de fontes renováveis na oferta interna de energia foi de 45% (Figura 6). Considerando apenas a geração de energia elétrica, destacam-se as fontes hidráulicas, responsáveis por 68% do total (Figura 7).

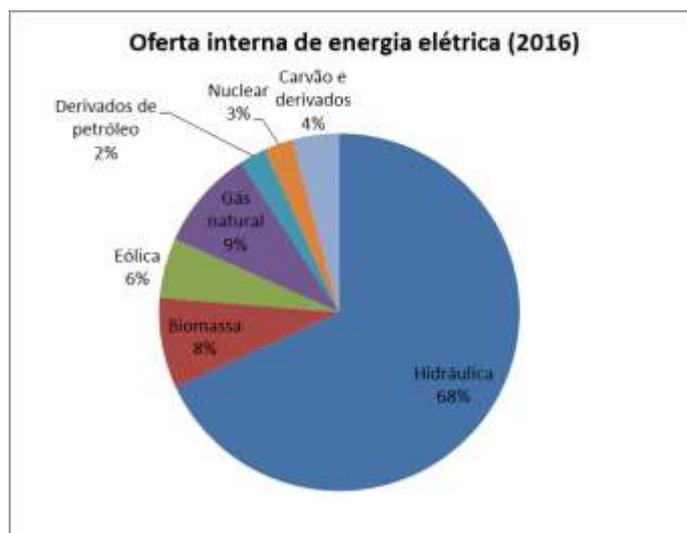
O setor industrial e o de transporte são responsáveis pelos maiores percentuais de consumo de energia no Brasil (Figura 8).

Figura 6- Oferta interna de energia no Brasil em 2016



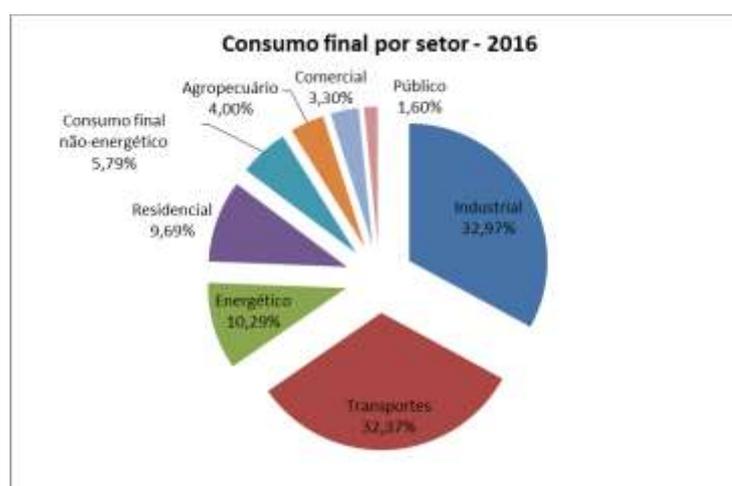
Fonte: Adaptado de EPE (2017)

Figura 7- Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2016



Fonte: Adaptado de EPE (2017)

Figura 8- Consumo final de energia no Brasil por setor em 2016.

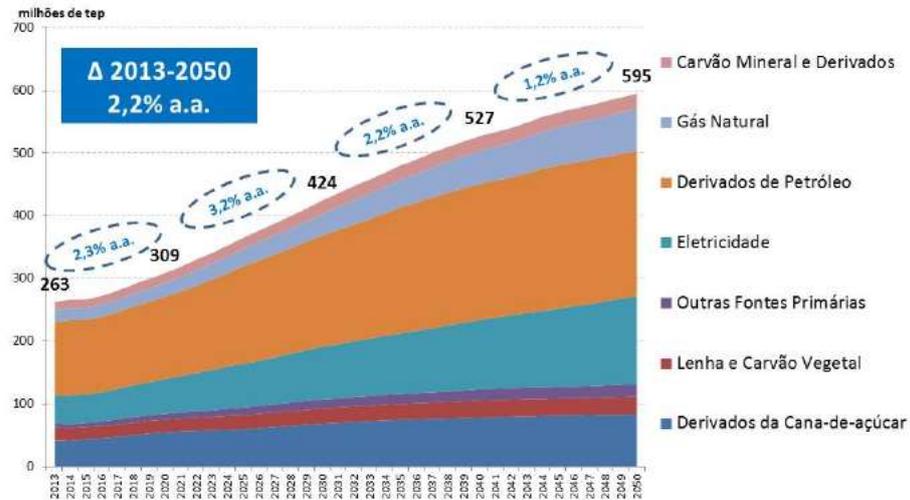


Fonte: Adaptado de EPE (2017)

Analisando as estimativas para as próximas décadas, vê-se que a demanda brasileira total de energia irá aumentar pouco mais de duas vezes, com destaque para o avanço do gás natural, da eletricidade e dos derivados de petróleo e de cana-de-açúcar (Figura 9).

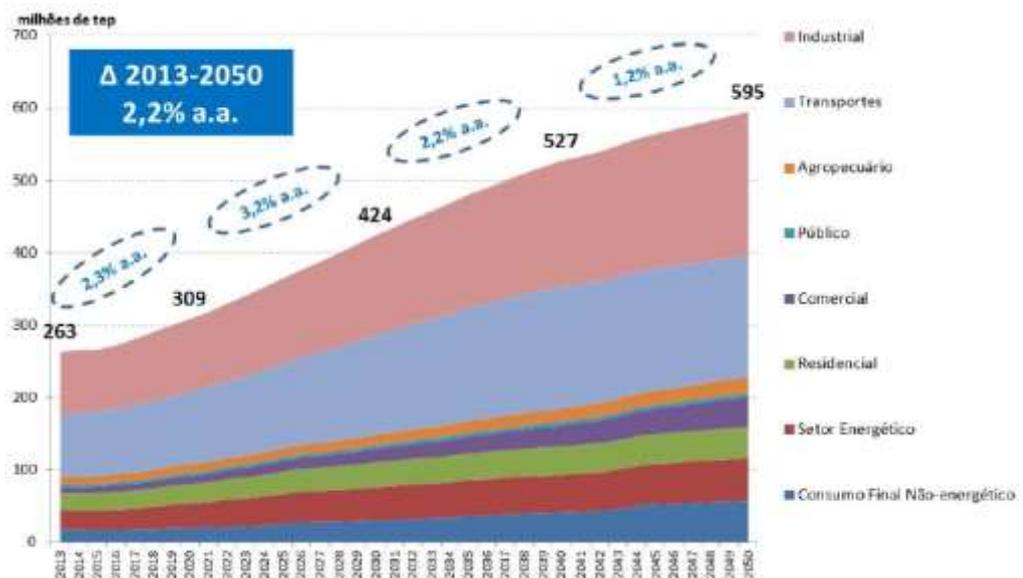
O setor comercial e o não energético terão maior participação, refletindo a realidade econômica destes segmentos nos próximos anos. O setor de transporte e o residencial, ao contrário, terão leve retração (Figura 10). No primeiro caso, a introdução de veículos híbridos e elétricos aumenta a eficiência energética, assim como o uso do gás natural e de iluminação fluorescente e LED nas residências.

Figura 9- Evolução da demanda total de energia no Brasil por fonte até 2050.



Fonte: EPE (2016)

Figura 10- Evolução da demanda total de energia no Brasil por setor até 2050.



Fonte: EPE (2016)

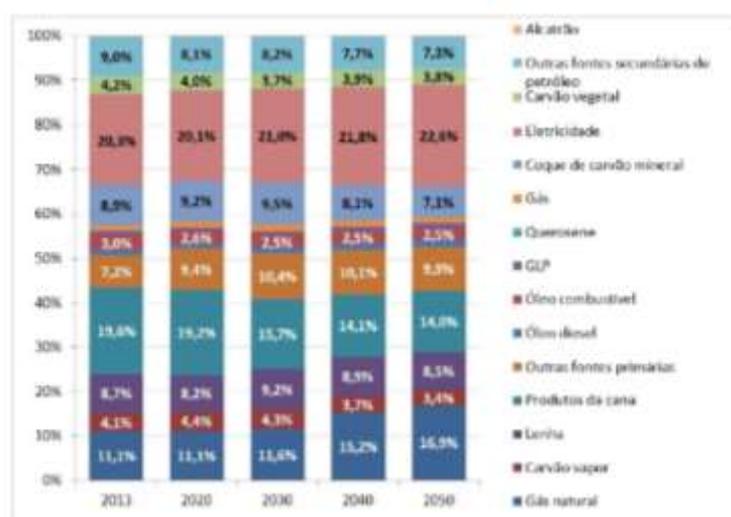
A demanda industrial deverá crescer, mas a taxas mais baixas, graças a gradual substituição das plantas mais antigas por mais novas e mais eficientes. De acordo com EPE (2016), a eficiência energética deve ser responsável por 18% de redução da demanda de energia em 2050. Apesar disso, o consumo final ainda deve passar de 84 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) para 198 milhões de tep entre 2016 e 2050.

Com esse aumento de consumo nas próximas décadas, o Brasil terá que modificar o seu parque gerador, tradicionalmente baseado em fontes hidráulicas. A região Amazônica,

apesar de ter potencial significativo de geração, está longe dos grandes centros urbanos e possui fatores sociais e ambientais relevantes que devem ser considerados. A variabilidade das chuvas também põe em risco esta fonte, que teve dificuldades no abastecimento em 2001/2002 e 2014/2015.

Desta forma, a distribuição do consumo final por fonte para a indústria apresentará alterações (Figura 11). A eletricidade ainda será a principal, aumentando de 20,3% em 2013 para 22,6% em 2050, sendo parte desta demanda suprida pela rede elétrica e parte pela autoprodução. Concomitantemente, a utilização do gás natural crescerá em média 3,4% ao ano até 2050.

Figura 11- Indústria: consumo final energético por fonte (%).



Fonte: EPE (2016)

Em 2009, a Confederação Nacional da Indústria publicou um diagnóstico das principais oportunidades e prioridades para o desenvolvimento do mercado de eficiência energética industrial (CNI, 2009). Foram analisados os investimentos realizados pelos programas nos 10 anos anteriores. As conclusões são bastante interessantes, destacando-se que:

1. A indústria não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética, apesar de ser o setor que mais consome no Brasil: Mesmo representando 32% do consumo, a média de recursos aplicados do Programa de Eficiência Energética no setor industrial foi de 9%;
2. 82% das oportunidades de economia de energia estão nos processos térmicos. Apesar disso, as iniciativas governamentais de eficiência energética foram no consumo de eletricidade.

A IEA, em relatório publicado em 2015, também citou como desafios a concentração dos programas no Ministério de Minas e Energia (MME) e a falta de mão-de-obra qualificada.

Percebe-se que é necessário ajustar o foco dos programas de eficiência energética para a real demanda do cenário brasileiro. Já existem iniciativas direcionadas para a indústria, como o PROCEL Indústria e o PROESCO, mas que ainda devem ser expandidas. Em 2012 foi lançado o projeto de lei PL n° 3672, cujo propósito é alterar a lei n° 9.991 de forma que a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética priorize iniciativas da indústria nacional. Em 2016, o projeto foi transformado em lei ordinária.

Apesar dos obstáculos citados, Godoi (2011) afirma que um aspecto que estimula os projetos de eficiência energética na indústria é o preço da energia, no qual estão embutidos diversos tributos, pressionando os custos de produção no Brasil. Isto faz com que as próprias empresas busquem consumir menos e implantar processos mais eficientes, além de pressionarem o governo federal por programas mais robustos.

No Plano Nacional de Eficiência Energética divulgado em 2011 pelo MME, é descrita uma lista de ações propostas para o setor industrial. Algumas delas são:

1. Criar mecanismos que estimulem e conscientizem as empresas, indústrias ou empreendimentos a contratar serviços de consultoria, ou apoio de uma organização, empresa ou especialista em eficiência energética;
2. Estudar a criação de incentivos fiscais e tributários para modernização industrial e eficiência energética, incluindo a substituição de equipamentos ineficientes por similares eficientes;
3. Elaborar, em parceria com setor industrial, programas focados no aumento de eficiência de processos térmicos industriais e em projetos de cogeração e
4. Fomentar a utilização de resíduos industriais (biomassa, gases de coqueria e de fornos) em processos de cogeração de energia, tornando eficientes os processos industriais envolvidos.

Caso sejam implementadas, estas ações contribuirão para a redução na taxa de crescimento da demanda de energia no país nos próximos anos.

### 3.3 GESTÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA

De acordo com Backlund *et al.* (2012), uma forma viável de melhorar a eficiência energética na economia é combinar investimentos em novas tecnologias com a promoção de um bom sistema de gestão de energia (SGE). IEA (2012) concorda com esta colocação, afirmando que a implementação de um SGE é uma das soluções mais efetivas para reduzir consumo e custos. Enquanto uma companhia não gerencia ativamente o seu uso de energia e não tem um planejamento para tal, ela é significativamente menos eficiente energeticamente do que poderia ser.

Schulze *et al.* (2015), a partir de uma revisão de trabalhos publicados entre 1979 e 2014, elaboraram uma definição para o termo “gestão de energia”.

“(…)atividades sistemáticas, procedimentos e rotinas em uma companhia industrial incluindo elementos de planejamento/estratégia, implementação/operação, controle, organização e cultura, envolvendo tanto processos de produção quanto de suporte, com o objetivo de continuamente reduzir o consumo de energia na empresa e seus custos relacionados” (Schulze *et al.*, 2015, p. 26).

Worrell *et al.* (2010) citam como pontos fundamentais num SGE o estabelecimento de políticas e procedimentos necessários para assegurar os resultados de longo prazo, suporte da direção, metas bem estabelecidas e a adoção da metodologia da melhoria contínua. Estes pontos também são premissas para a certificação na norma ISO 50001, uma das ferramentas mais conhecidas para a implantação de um SGE numa companhia.

Até 2016, já haviam sido certificadas 20216 organizações na ISSO 50001, sendo que aproximadamente 85% delas encontravam-se na Europa. No Brasil, apenas 22 empresas eram certificadas.

Segundo a Organização Internacional de Normalização (ISO), esta norma:

“especifica requisitos para estabelecer, implementar, manter e melhorar o sistema de gestão de energia, cujo propósito é habilitar uma organização a seguir uma abordagem sistemática para a melhoria contínua da performance energética, incluindo eficiência energética, uso e consumo de energia”. (ISO, 2011).

Publicada em 2011, a ISO 50001 baseia-se no ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA), que em português, significa planejar, executar, verificar e agir. Esta ferramenta é responsável por manter a melhoria contínua do SGE, em que:

1. Plan (Planejar): inclui executar a revisão energética e estabelecer linha de base, indicadores de desempenho energético (IDEs), objetivos, metas e planos de ação necessários para obter resultados que levarão à melhoria de desempenho energético em conformidade com a política energética da organização;
2. Do (Fazer): implementa os planos de ação da gestão de energia;
3. Check (Verificar): monitora e mede processos e características principais de operações que determinam o desempenho energético em relação à política e objetivos energéticos. Divulga resultados e
4. Act (Agir): toma ações para melhorar continuamente o desempenho energético e o SGE.

O modelo de gestão sugerido pela norma é ilustrado na Figura 12.

A norma é um padrão de processo, ou seja, não define níveis ideais de performance, mas fornece direcionamentos para a integração do sistema de gestão dentro de uma companhia.

A revisão energética (ou diagnóstico energético) na etapa de planejamento seria a determinação do desempenho energético da organização com base em dados e outras informações, conduzindo à identificação de oportunidades de melhoria.

Figura 12- Metodologia da norma ISO 50001.

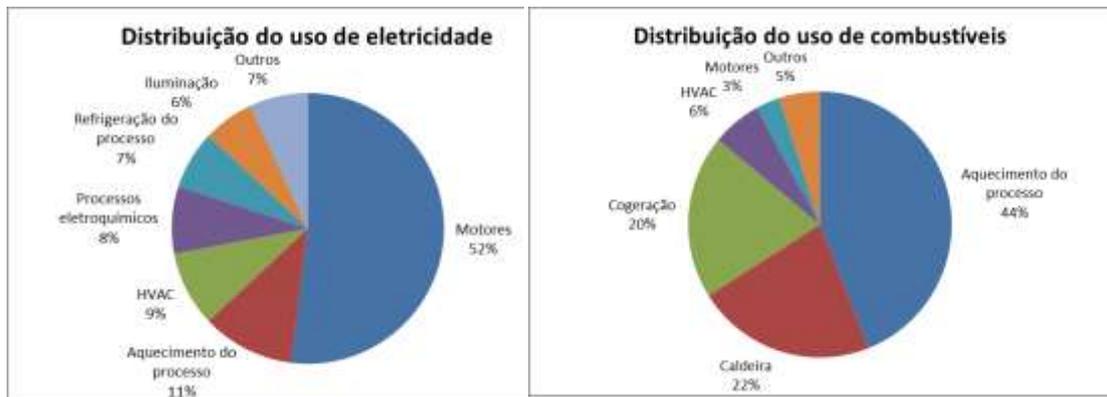


Fonte: Adaptado de ISO (2011)

### 3.4 OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Cada planta tem os seus usos finais de energia específicos de acordo com a sua realidade. Porém, em geral, poucos equipamentos são responsáveis pela maior parte do consumo. Como mostra a Figura 13, motores são responsáveis pela maior parcela de energia elétrica consumida numa instalação, seguidos de aquecimento e resfriamento do processo, aquecimento do edifício, ventilação e condicionamento de ar (HVAC), e iluminação (WORRELL *et al.*, 2010). Aquecimento do processo, caldeiras e cogeração dominam o uso de combustíveis.

Figura 13- Distribuição do uso de energia elétrica e combustível na indústria dos Estados Unidos.



Fonte: Adaptado de WORRELL *et al.* (2010)

Conforme descrito no item 3.3, a execução do diagnóstico energético auxilia na identificação de oportunidades de melhoria para o processo da organização analisada.

Um primeiro aspecto seria entender quando a energia está sendo utilizada. Verificar, por exemplo, se há intervalos entre os horários produtivos, se os equipamentos de fato são desligados quando estão fora de operação, se há possibilidade de diminuir o tempo de funcionamento programando melhor a produção, entre outros. Executando estas ações, é provável que a demanda possa até diminuir, promovendo uma adequação nos valores pagos para a concessionária.

Da mesma forma, é necessário analisar a configuração dos equipamentos: se estão trabalhando dentro da sua faixa de operação e se estão ajustados corretamente. Segundo COPEL (2005), o funcionamento das máquinas, equipamentos e instalações fora de suas condições normais é uma das consequências de uma manutenção precária e provoca consumo excessivo de energia. De acordo com o estado em que o maquinário se encontra, é possível

também recorrer à substituição. Nem sempre este investimento terá o tempo de retorno que o cliente gostaria, mas os benefícios podem compensar. Muitas vezes já há tecnologias mais eficientes disponíveis no mercado.

Um fator que também pode acarretar perdas é o próprio projeto das máquinas, que pode ser concebido sub ou superdimensionado. O projeto arquitetônico também deve ser levado em consideração, pois contempla diversos aspectos do consumo de energia, como a ventilação e a iluminação natural disponível.

Outra ação de conservação de energia em uma indústria é reavaliar as especificações técnicas de seus produtos, com o intuito de verificar a possibilidade da redução do consumo de energia para produzi-los. Melhorar a qualidade do produto através do aprimoramento de processos e controles é também uma forma indireta de se conservar energia, pois, se a qualidade melhora, o índice de rejeição no controle de qualidade diminui e com isso se reduz a quantidade de energia agregada aos refugos (GUERRERO *et al.*, 2011). A automação, por exemplo, é um recurso que aumenta a qualidade do produto e exige menos matéria-prima.

Worrell *et al.* (2010) apresentam um guia de boas práticas energéticas. Embora o estudo tenha sido voltado para a realidade dos Estados Unidos, as sugestões podem ser seguidas em qualquer tipo de indústria, independentemente do tamanho ou do produto. São citadas formas de gerenciar o uso da energia e de como reduzir o consumo com iluminação, aquecimento/refrigeração, motores, ar comprimido, bombas, sistemas de água quente e vapor e fornos (Tabela 1).

Tabela 1- Boas práticas energéticas para o setor industrial.

<b>Programas e sistemas de gerenciamento de energia</b>	Uso de iluminação natural
Programas de gerenciamento de energia	Substituição de lâmpadas incandescentes
Monitoramento da energia	<i>Fornos</i>
Grupos de trabalho para energia	Recuperação de gases de exaustão
<b>Sistemas de vapor</b>	Controle da razão ar/combustível
<i>Caldeiras</i>	<b>Motores e bombas</b>
Controle do processo da caldeira	<i>Motores</i>
Redução da quantidade de gases de exaustão	Plano de gestão de motores

Redução do excesso de ar	Manutenção
Sistemas dimensionados adequadamente	Drives de velocidade variável
Melhor isolamento da caldeira	Motores devidamente dimensionados
Manutenção adequada	Correção do fator de potência
Recuperação de gases de exaustão	<i>Bombas</i>
<i>Sistemas de distribuição de vapor</i>	Manutenção do sistema de bombas
Melhorar isolamento do sistema de distribuição	Monitoramento do sistema de bombas
Manutenção do isolamento	Redução da demanda
Reparo de vazamentos	Dimensionamento adequado da tubulação
<b>Edifício</b>	Drives de velocidade variável
<i>Refrigeração</i>	Controles
Sistemas de monitoramento e controle	<b>Sistemas de ar comprimido</b>
Uso de ventiladores de exaustão eficientes	Manutenção
Recuperação de água gelada	Monitoramento
Janelas de baixa emitância	Redução de vazamentos
Temperatura diferente para períodos não produtivos	Desligar ar desnecessário
<i>Iluminação</i>	Usar ar na pressão mais baixa possível
Desligamento sem ocupação	Minimização de perda de carga
Adequação níveis de iluminação quando em excesso	Dimensionamento adequado da tubulação

Fonte: WORRELL *et al.* (2010)

### 3.4.1 Recuperação de energia

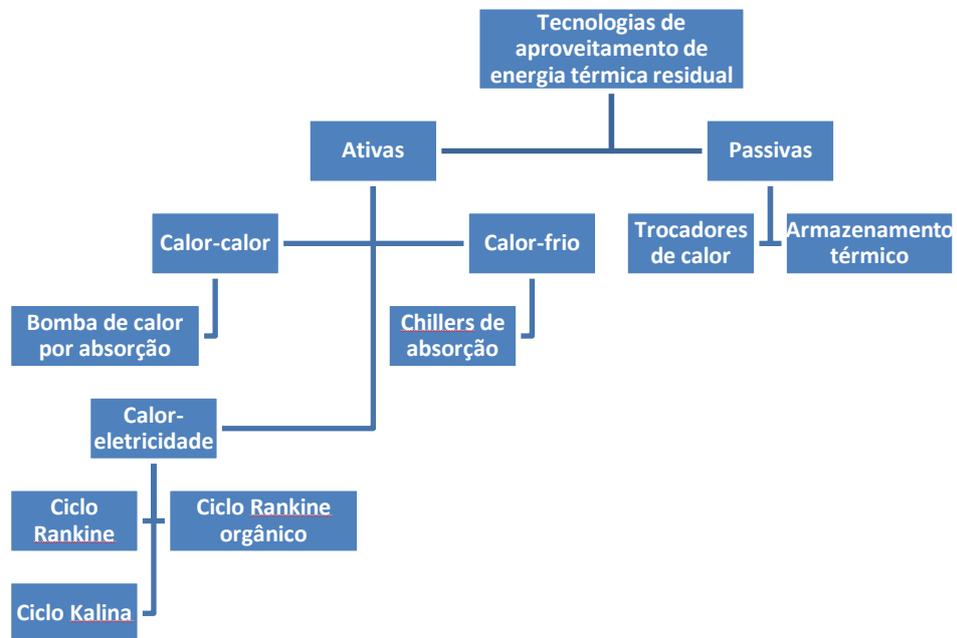
A recuperação de energia pode ser definida como a coleta e reutilização da energia de um processo que seria perdida. Na indústria, pode-se citar o reaproveitamento de energia cinética e, principalmente, de energia térmica.

A frenagem regenerativa é um exemplo de aproveitamento da energia cinética: este mecanismo reduz a velocidade do veículo convertendo parte da energia cinética em outra forma de energia útil, como corrente elétrica e ar comprimido (CIBULKA, 2009). Elevadores,

pontes rolantes, guindastes, centrífugas, correias transportadoras e veículos elétricos são exemplos de acionamentos elétricos com potencial de recuperação de energia.

As tecnologias que usam energia residual térmica no setor industrial podem ser categorizadas em passivas ou ativas, conforme o calor está sendo utilizado. As principais tecnologias passivas são trocadores de calor e armazenadores térmicos, que são empregadas para reciclar ou reutilizar o calor residual para aquecer outros processos. As tecnologias ativas podem ser classificadas em três tipos, dependendo do produto entregue (Bruckner *et al.*, 2015): as que fornecem calor, frio ou eletricidade. Um diagrama com a classificação das tecnologias existentes é mostrado na Figura 14.

Figura 14- Caracterização de tecnologias de recuperação de energia térmica residual



Fonte: Bruckner *et al.* (2015)

Segundo a Carbon Trust<sup>1</sup>, as fontes comuns de calor residual que apresentam oportunidades de aproveitamento economicamente viáveis são as seguintes:

1. sistema de extração por ventilação;
2. gases de exaustão de caldeiras;
3. purga da caldeira;
4. compressores de ar;
5. plantas de refrigeração;

<sup>1</sup> A Carbon Trust se define como sendo um grupo de profissionais independentes que ajuda organizações a reduzir as emissões de carbono e aumentar a eficiência energética.

6. gases de exaustão a altas temperaturas de fornos e queimadores;
7. efluentes líquidos quentes e
8. plantas de geração de energia.

Entre as tecnologias de aproveitamento existentes, serão enfatizados os trocadores de calor recuperadores e os chillers de absorção, aplicáveis no escopo do estudo de caso realizado neste trabalho.

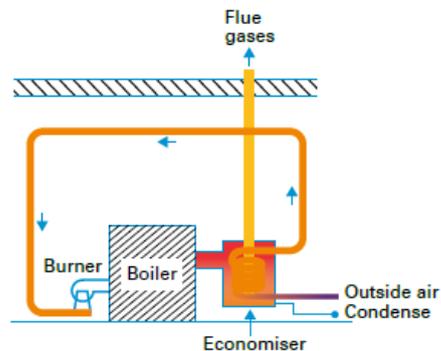
### *Recuperador*

Um recuperador é um trocador de calor contínuo de baixa/média temperatura (até aproximadamente 700°C) que usa a energia sensível dos produtos de saída para aquecer o fluido de entrada. Existe uma vasta gama de recuperadores e estes utilizam transferência de calor por radiação ou por convecção. Estes trocadores de calor geralmente são contra fluxo, onde as maiores temperaturas de ambos os fluidos estão em uma extremidade e as menores temperaturas, na outra.

Em caldeiras, por exemplo, cerca de 18% das perdas de energia térmica ocorre pelos gases de exaustão, os quais podem ser utilizados para pré-aquecer o ar de combustão por meio de um economizador (Figura 15).

O mesmo princípio pode ser aplicado em unidades de ventilação para pré-aquecer/resfriar o ar que vem da atmosfera. Neste caso são utilizados trocadores de calor de placas (Figura 16).

Figura 15- Economizador usado para pré-aquecer o ar de combustão.



Fonte: CARBON TRUST (2011)

Figura 16- Princípio de operação de um recuperador em edifícios.



Fonte: CARBON TRUST (2011)

Um exemplo interessante de recuperação de calor foi descrito por Gomes (2014): o autor analisou uma central termelétrica em Portugal que gera eletricidade com motores de combustão interna. Os gases de escape são utilizados para aquecer água até o estado de vapor, que por sua vez gera energia passando por uma turbina. Zucchi (2012) também aborda o tema da recuperação de energia, desta vez focando em veículos de passeio. Segundo ele, a utilização dos gases de exaustão é eficaz para o rápido aquecimento do motor, possibilita o rápido aquecimento da cabine para conforto térmico dos passageiros e acelera o aumento da temperatura do óleo da transmissão após a partida, acarretando um menor consumo de combustível.

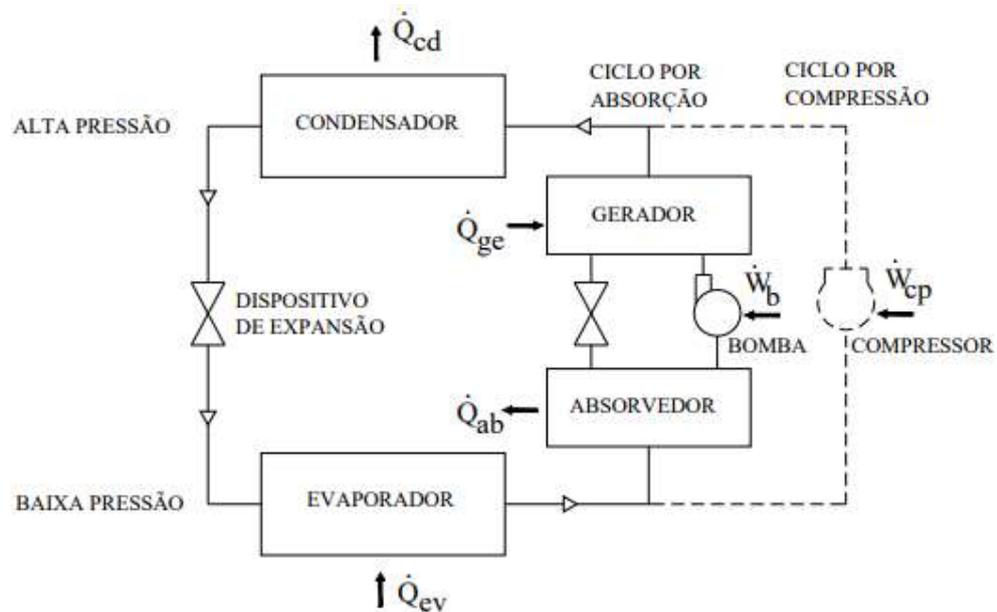
#### *Chiller de absorção*

Este equipamento utiliza a transferência de calor de uma fonte que esteja a uma temperatura relativamente alta para seu funcionamento, baseando-se no processo de absorção de uma mistura refrigerante-absorvedor. Fazendo uma comparação com o tradicional ciclo de compressão a vapor, a diferença fundamental seria a substituição do compressor pelo conjunto absorvedor, bomba e gerador (Figura 17). Este sistema é eficiente e mais ambientalmente correto por não usar refrigerante a base de clorofluorcarbono, prevenindo, então, os danos à camada de ozônio.

Pode-se dividir o chiller de absorção de acordo com o par absorvedor-refrigerante empregado. Os ciclos mais comuns utilizam amônia como refrigerante e água como absorvedor ( $\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$ ) ou água como refrigerante e brometo de lítio como absorvedor ( $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ ). O primeiro vem sendo usado em aplicações industriais onde são necessárias temperaturas abaixo de  $0^\circ\text{C}$ . Já o segundo, apesar da limitação da temperatura ( $5$  a  $10^\circ\text{C}$ ),

fornece uma melhor performance e possui um sistema menos complexo que o anterior (HORUZ, 1998).

Figura 17- Sistema simples de refrigeração por absorção.



Fonte: Carvalho (2007)

Será descrito a seguir o chiller de absorção utilizando o par LiBr-H<sub>2</sub>O, pelas razões supracitadas.

De acordo com o número de processos de geração de vapor de refrigerante, o chiller de absorção geralmente é classificado como de simples, duplo ou triplo efeito. O sistema mais elementar, de simples efeito, é o mais comum. O refrigerante (no caso, a água) vinda do evaporador é absorvida pela solução concentrada de brometo de lítio no absorvedor, processo do qual é liberado calor para o ambiente. Após este processo, a solução se torna diluída e é bombeada para o gerador, onde será aquecida. A água, então, evapora e flui para o condensador, onde é condensada. Em seguida o fluido é expandido e tem sua pressão reduzida, depois passando pelo evaporador. Paralelamente, a solução concentrada de brometo de lítio que sai do gerador volta ao absorvedor. Todo o ciclo ocorre abaixo da pressão atmosférica.

No chiller de absorção de duplo efeito há três níveis de pressão: alto (gerador de alta pressão), médio (gerador de baixa pressão e condensador) e baixo (evaporador e absorvedor). É possível classificar este tipo de chiller de acordo com o direcionamento do fluxo: em série, paralelo ou reverso paralelo.

No caso do fluxo em série (Figura 18a), a solução diluída que sai do absorvedor é bombeada para o gerador de alta pressão, passando por dois trocadores de calor para pré-aquecimento. Em seguida, o refrigerante que evapora neste gerador é usado como fonte de calor no gerador de baixa pressão, de onde segue para o condensador. O refrigerante que evapora no gerador de baixa pressão também vai para o condensador. Ambos os fluxos, ao sair do condensador, passam por uma válvula de expansão e são direcionados para o evaporador. Por fim, o refrigerante é absorvido pela solução concentrada que sai do gerador de baixa pressão (já combinada com a solução concentrada do gerador de alta pressão) e retorna para o absorvedor.

No sistema com fluxo paralelo (Figura 18b), a solução diluída que sai do primeiro trocador de calor se divide em duas correntes. Uma segue para o gerador de alta pressão pelo trocador de calor de alta temperatura e a outra para o gerador de baixa pressão. Assim como no primeiro caso, o calor latente do refrigerante que sai do gerador de alta pressão é usado como fonte do gerador de baixa pressão. As soluções concentradas de ambos os geradores são combinadas, passam pelo trocador de calor de baixa temperatura e vão para o absorvedor.

No terceiro layout, de fluxo reverso paralelo (Figura 18c), a solução diluída que sai do absorvedor é bombeada para o gerador de baixa pressão, passando pelo trocador de baixa temperatura. A solução concentrada que sai deste gerador é então dividida em duas correntes: uma é bombeada para o gerador de alta pressão, passando pelo trocador de alta temperatura. Outra une-se à solução concentrada que sai do gerador de alta pressão e parte em direção ao absorvedor.

Na prática, a concentração de brometo de lítio na água em alguns pontos do ciclo é alta e próxima da curva de cristalização da solução, interrompendo o funcionamento do equipamento. O local mais provável de ocorrência é antes do absorvedor, quando a solução está mais concentrada e a temperaturas mais baixas. Segundo Farshi *et al.* (2011) os sistemas de fluxo paralelo teriam menos propensão a ocorrência de cristalização que os de fluxo em série.

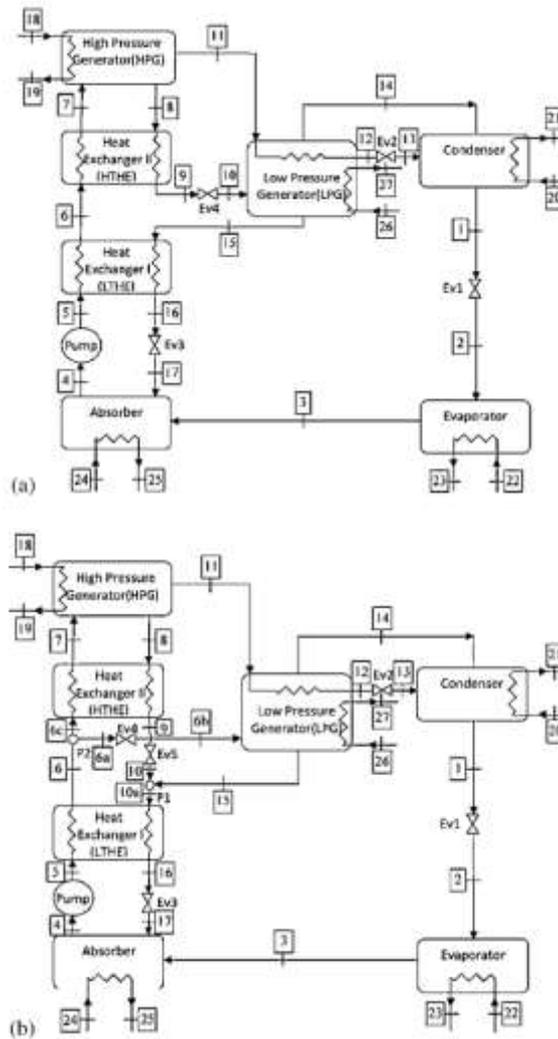
A eficiência, ou coeficiente de performance (COP) deste equipamento pode ser dada pela Equação 4.

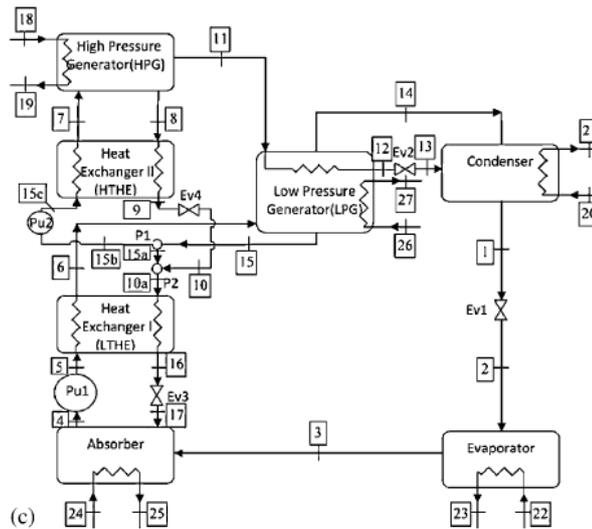
$$COP = \frac{\text{capacidade de refrigeração}}{\text{potência térmica requerida} + \text{potência elétrica requerida}} \quad (4)$$

Geralmente a potência elétrica necessária é desprezível em relação à potência térmica, resumindo o cálculo à Equação 5.

$$COP = \frac{\text{capacidade de refrigeração}}{\text{potência térmica requerida}} = \frac{Q_{\text{exaporador}}}{Q_{\text{gerador}}} \quad (5)$$

Figura 18- Sistema de refrigeração de absorção de duplo efeito: (a) Fluxo em série (b) Fluxo paralelo (c) Fluxo reverso paralelo.





Fonte: FARSHI *et al.* (2012)

Entre os principais fabricantes do mercado (LG, Broad, Carrier, Thermax, York, Shuangliang e Kawasaki), os produtos mais comuns são os de simples e duplo efeito, embora chillers de triplo efeito já tenham sido divulgados por Thermax, Shuangliang e Kawasaki, com coeficientes de eficiência de até 1,9. As características principais dos sistemas encontrados no mercado podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2- Características de sistemas a LiBr-H<sub>2</sub>O para temperaturas de refrigeração entre 5°C e 10°C.

Efeito	Simple	Duplo	Triplo
<b>Fonte de calor utilizada</b>	Água quente (90-130°C), vapor saturado	Água quente (130°C-180°C), vapor (1-10 bar), gases (430-660°C) ou queima direta	Água quente (240°C), vapor (12-25 bar), queima direta
<b>Capacidade de refrigeração (kW)</b>	53 kW - 12300 kW	175 kW - 14000 kW	175 kW - 5275 kW
<b>COP</b>	0,67-0,83	1,21-1,55	1,6-1,9

### 3.4.2 Cogeração

Uma área em que há grandes oportunidades para economizar combustível, e consequentemente aumentar a eficiência energética de um sistema, é a cogeração. As usinas de cogeração com resíduos agrícolas no Brasil, por exemplo, vêm ganhando bastante destaque, principalmente com a utilização do bagaço da cana de açúcar.

Segundo NOGUEIRA (2007), a cogeração talvez seja um dos exemplos mais emblemáticos do potencial ignorado do uso eficiente dos recursos energéticos, despercebido pela maioria dos consumidores de combustível em aquecedores, fornos e caldeiras.

Barbeli (2015) afirma que o termo “cogeração” tem como significado a produção simultânea e sequencial de duas formas de energia, por meio de um único insumo energético. Este conceito é semelhante ao empregado por Hinrichs *et al.* (2010) e Moran *et al.* (2014), o qual acrescenta que uma consequência do emprego de um sistema de cogeração seria a redução de custos, já que são dois produtos para uma única entrada de combustível.

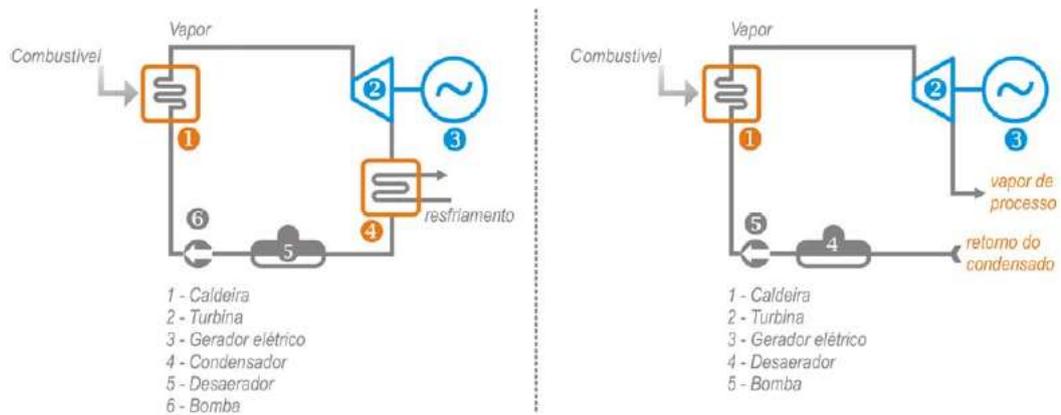
A cogeração não é uma única tecnologia, mas um sistema de energia integrado que pode ser adaptado às necessidades do usuário final. De acordo com OEH (2014), as unidades de cogeração predominantemente usam gás natural como fonte de energia, que tem fatores de emissão mais baixos que os demais combustíveis fósseis.

Como exemplo, têm-se a comparação feita por Barja (2006), mostrada na Figura 19. O autor mostra duas plantas de geração termelétrica a vapor, sendo que uma delas utiliza um sistema de cogeração. Os respectivos balanços térmicos são apresentados na Figura 20. Conforme mostra a figura, para a mesma entrada de combustível, o primeiro sistema tem uma eficiência de 35%, enquanto que no segundo chega a 82% ao utilizar o calor residual que antes estava sendo desperdiçado.

É possível classificar os sistemas de cogeração em dois tipos:

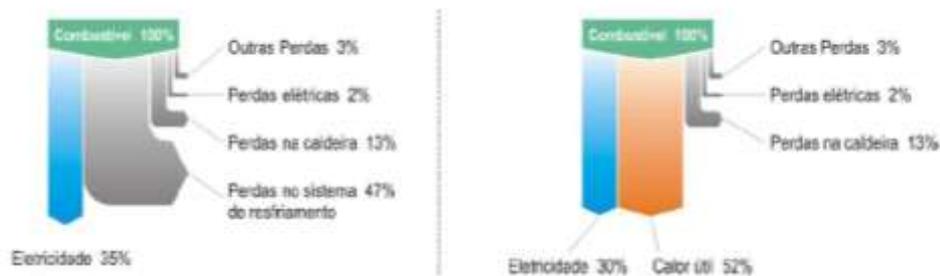
- Ciclo de fundo: Usa o vapor que já foi utilizado em processo industrial em uma turbina a vapor de baixa pressão para gerar eletricidade. Tem limitações pois em certas situações o calor residual pode ser pequeno ou de difícil recuperação, o que limita a geração de potência.
- Ciclo de topo: Gera eletricidade e utiliza os gases de exaustão ou o vapor de alta pressão como vapor de processo para aquecimento e/ou eletricidade adicional. Esta é a configuração mais comum dos processos de cogeração. Podem ser utilizados motores de combustão interna, turbinas a vapor, turbinas a gás ou ainda a combinação das duas últimas, resultando num ciclo combinado.

Figura 19- Sistema de geração pura de eletricidade em ciclo a vapor (à esquerda) e sistema de geração combinada de calor e eletricidade – cogeração (à direita).



Fonte: BARJA (2006)

Figura 20- Balanço térmico típico de planta de geração pura, em ciclo a vapor (à esquerda) e balanço térmico de uma planta semelhante, com sistema de cogeração agregado (à direita).



Fonte: BARJA (2006)

Em ambos os casos, a eficiência global aumenta significativamente já que parte do trabalho que seria desperdiçado se torna útil. A seleção da tecnologia adequada de cogeração deve levar em consideração, entre outros, a disponibilidade do combustível, os impactos ambientais decorrentes do processo, a eficiência de conversão de combustível em energia elétrica além dos custos embutidos.

Os principais componentes de um sistema de cogeração são mostrados na Tabela 3.

As turbinas a gás chamam a atenção devido às vantagens que apresentam. Atualmente são vistas como opção viável para geração distribuída em potências entre 1 MW e 40 MW (sem considerar as chamadas “microturbinas”, com até 1MW). As turbinas são compactas, têm alta confiabilidade e independem de condições climáticas. Além disso, segundo NREL

(2003), a turbina a gás gera eletricidade e calor de alta qualidade dos gases de exaustão, ideal para uso em cogeração, fazendo com que a eficiência do sistema chegue a até 80%.

Tabela 3- Componentes típicos de um sistema de cogeração

<b>Unidade</b>	<b>Exemplos</b>
Motor primário	Turbinas Motores recíprocos Células combustível
Gerador	Síncrono Indução
Tecnologia térmica	Trocadores de calor Caldeiras de recuperação Chillers de absorção

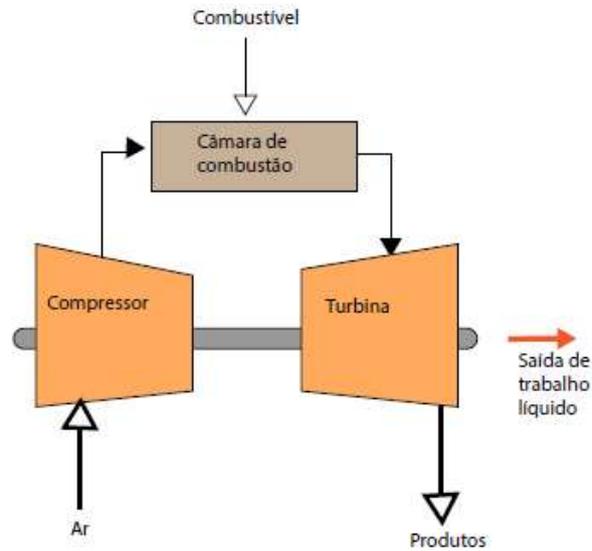
Fonte: OEH (2014)

O desenvolvimento das turbinas a gás começou pouco antes da Segunda Guerra Mundial, para propulsão de aeronaves. Apenas nos anos 1950 elas começaram a se expandir para outros campos de aplicação.

Os três principais componentes de uma turbina a gás são o compressor, a câmara de combustão e a turbina (Figura 21), que atuam seguindo o Ciclo de Brayton. O primeiro passo do ciclo é a compressão do fluido de trabalho. Se após a compressão o fluido fosse expandido diretamente na turbina e não houvesse perdas, a potência desenvolvida pela turbina seria a mesma absorvida pelo compressor. Porém, esta potência pode aumentar com a adição de energia para aumentar a temperatura do fluido antes da expansão. Este aumento de temperatura ocorre pela queima de um combustível. Aquecido, o ar se expande na turbina, sendo descarregado em seguida. A turbina é acoplada a um gerador, que gera potência elétrica.

Parte do trabalho é usada para acionamento do compressor e a diferença fica disponível para o uso final desejado. A energia que não é convertida em potência na turbina é rejeitada nos gases de exaustão. A eficiência térmica de uma turbina a gás é calculada segundo a Equação 6 e a elétrica, segundo a Equação 7.

Figura 21- Turbina a gás simples



Fonte: Elaborada pela autora

$$\eta_t = \frac{W_{turbina} - W_{compressor}}{\dot{Q}_{entra}} \quad (6)$$

$$\eta_{el} = \frac{W_{gerador}}{\dot{Q}_{entra}} \quad (7)$$

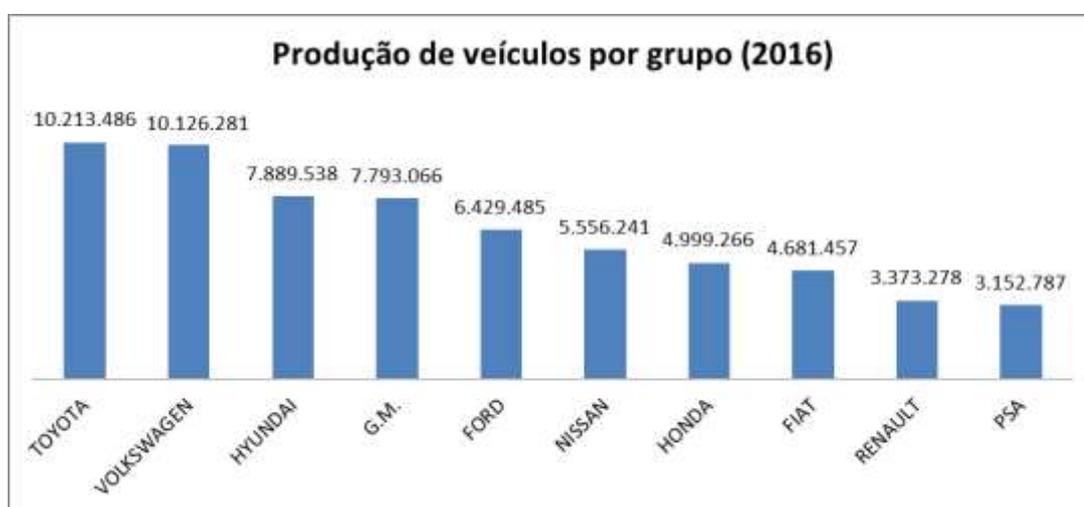
Na prática, perdas ocorrem no compressor e na turbina, que causam redução na eficiência do sistema. Outro fator limitante seria a temperatura de trabalho da turbina. Porém, de acordo com Martinez *et al.* (2011), a evolução na tecnologia de fabricação já fez com que as eficiências do compressor e da turbina chegassem a 90% e temperaturas ficassem entre 800°C e 1700°C.

### 3.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Em 2015, uma pesquisa realizada pela OICA (Organização Internacional dos Construtores de Automóveis) revelou que 57% da população mundial não consegue imaginar sua vida sem um carro. No entanto, este público também exige cada vez mais tecnologia, eficiência e inovação, contribuindo para o desenvolvimento contínuo desta indústria.

A indústria automotiva emprega hoje cerca de 9 milhões de pessoas diretamente, chegando a 5% das pessoas no setor industrial (OICA, 2017). Sarti e Borghi (2015) descrevem a indústria automobilística como um setor cuja estrutura de mercado é concentrada, ou seja, poucas e grandes organizações de escala global respondem pela maior parte das vendas. Segundo eles, a concorrência se dá principalmente por meio da diferenciação de produto, o que faz com que nichos de mercado sejam criados e haja a busca constante por melhorias. De fato, em 2016, os 10 maiores produtores corresponderam a cerca de 70% do mercado global (Figura 22).

Figura 22- Produção de veículos em 2016 para os maiores grupos do setor.



Fonte: OICA (2017)

Na Tabela 4, é possível verificar os maiores países produtores de veículos no ano de 2016. Neste período, a produção global chegou a 94 milhões de veículos, onde a China é responsável por quase 30% do total. Em 2016, o Brasil ficou na 10ª posição e teve uma redução de 11,2% na produção em relação ao ano anterior. A evolução da produção de veículos no Brasil pode ser vista na Figura 23.

Houve uma retração bastante significativa a partir de 2013, quando o cenário econômico nacional passou a impactar de forma negativa em todos os setores. Atualmente, a ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores) tem 31 empresas associadas, responsáveis por 67 unidades industriais (veículos, máquinas agrícolas e rodoviárias, motores, componentes, outros produtos) sediadas em todas as regiões do país.

Tabela 4- Estatísticas de produção de veículos em 2016.

	<b>País</b>	<b>Carros</b>	<b>Veículos comerciais</b>	<b>Total</b>	<b>Variação em relação a 2015</b>
1°	China	24,420,744	3,698,050	28,118,794	14.5%
2°	EUA	3,934,357	8,263,780	12,198,137	0.8%
3°	Japão	7,873,886	1,330,704	9,204,590	-0.8%
4°	Alemanha	5,746,808	315,754	6,062,562	0.5%
5°	Índia	3,677,605	811,36	4,488,965	7.9%
6°	Coréia do Sul	3,859,991	368,518	4,228,509	-7.2%
7°	México	1,993,168	1,604,294	3,597,462	0.9%
8°	Espanha	2,354,117	531,805	2,885,922	5.6%
9°	Canadá	802,057	1,568,214	2,370,271	3.8%
10°	Brasil	1,778,464	377,892	2,156,356	-11.2%
11°	França	1,626,000	456	2,082,000	5.6%
12°	Tailândia	805,033	1,139,384	1,944,417	1.8%
13°	Reino Unido	1,722,698	93,924	1,816,622	8.0%
14°	Turquia	950,888	535,039	1,485,927	9.4%
15°	República Tcheca	1,344,182	5,714	1,349,896	8.3%
16°	Rússia	1,124,774	179,215	1,303,989	-5.4%
17°	Indonésia	968,101	209,288	1,177,389	7.2%
18°	Irã	1,074,000	90,71	1,164,710	18.6%
19°	Itália	713,182	390,334	1,103,516	8.8%
20°	Eslováquia	1,040,000	0	1,040,000	0.1%

Fonte: OICA (2017)

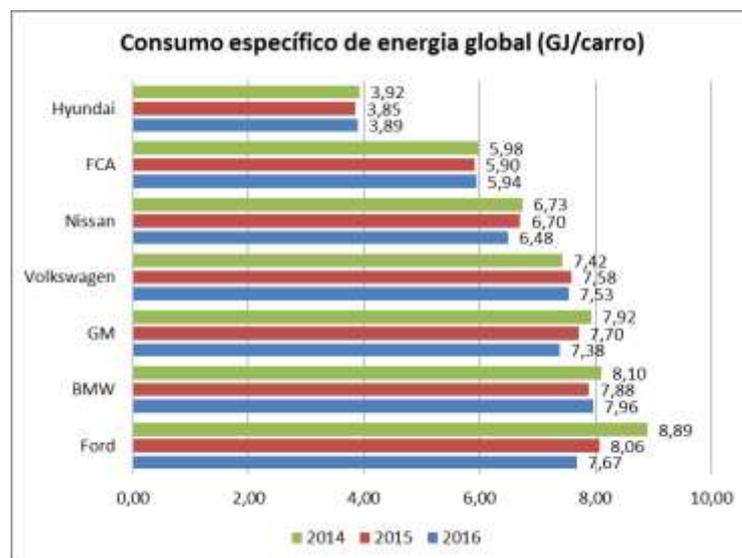
Figura 23- Produção de veículos motores no Brasil entre 1981 e 2016. Estão inclusos carros e veículos comerciais.



Fonte: ANFAVEA (2017)

De acordo com CNI (2012), os principais indicadores ambientais da indústria automobilística são consumo de insumos, geração de gases de efeito estufa e geração de resíduos por veículo produzido. Os esforços do setor são realizados em torno destes fatores. A preocupação com o consumo de energia é grande visto que é um indicador que tem impacto expressivo no custo de transformação do veículo. Baseado nos últimos relatórios de sustentabilidade divulgados, o gráfico da Figura 24 fornece uma visão geral do consumo específico de energia nos anos de 2014, 2015 e 2016 na indústria automobilística.

Figura 24- Consumo específico de energia para grupos da indústria automotiva em 2014, 2015 e 2016.



Fonte: Relatórios de sustentabilidade dos fabricantes

Já que o setor busca a recuperação econômica, o investimento em eficiência energética se apresenta como solução rápida e eficaz para reduzir custos sem interferir na qualidade do produto.

Fysikopoulos *et al.* (2012) resumem o consumo de energia da vida útil de um carro a quatro principais etapas: processamento do material, manufatura, uso e recuperação do veículo. Segundo ele, a energia representa entre 9 e 12% dos custos da manufatura.

Pode-se decompor a etapa de manufatura em quatro passos: Estamparia ou Prensa (geralmente em chapas de aço), Funilaria (onde ocorre a soldagem para formar a carroceria), Pintura e Montagem (quando são inseridos motor, eixos, transmissão e demais partes). Estes processos demandam diversos vetores energéticos, sendo os principais eletricidade, vapor, gás e ar comprimido. Cerca de dois terços das despesas com energia são gastas em eletricidade, enquanto combustíveis fósseis são empregados para gerar água quente, vapor e aquecer os fornos de cura do processo de Pintura, segundo Galitsky e Worrell (2008).

Os mesmos autores, baseados em estudos realizados nos Estados Unidos, Bélgica, Suécia e Alemanha, estimaram a distribuição do uso de energia em plantas montadoras de veículos (Tabela 5).

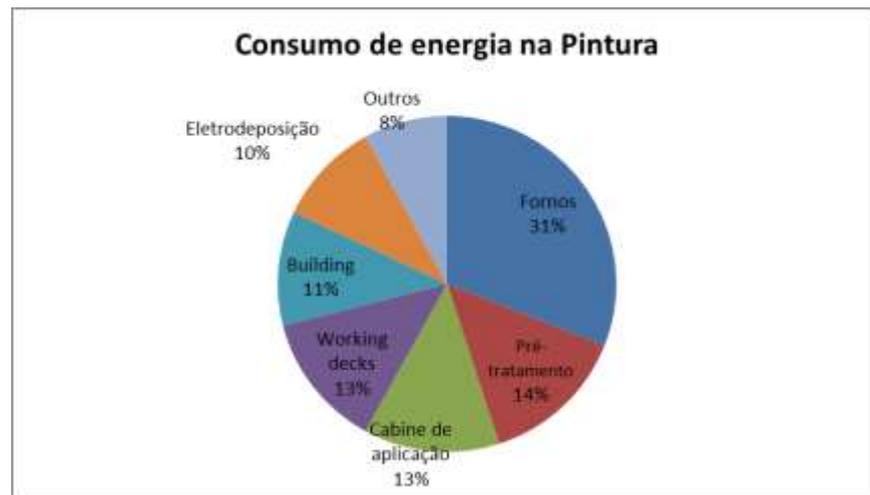
Tabela 5- Distribuição do uso de energia na fabricação de automóveis.

<b>Uso final</b>	<b>Uso de eletricidade</b>	<b>Consumo típico estimado de eletricidade (kWh/carro)</b>	<b>Média de eletricidade nos estudos (kWh/carro)</b>
HVAC	11-20%	95-170	160
Sistemas de pintura	27-50%	230-320	260
Iluminação	15-16%	130-140	130
Ar comprimido	9-14%	80-120	120
Manuseio de materiais/ferramentas	7-8%	60-70	60
Formação do metal	2-9%	20-80	30
Solda	9-11%	80-95	80
Outros	4-5%	35-45	20
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>730-1040</b>	<b>860</b>

Fonte: GALITSKY e WORRELL (2008)

Feng e Mears (2015) afirmam que cerca de 60% do consumo de energia de uma planta automotiva é destinado à área de Pintura. Castro (2015), ao analisar uma montadora brasileira verificou que 39% da energia elétrica, 57% do ar comprimido e 83% da água gelada da planta que ele analisou são destinados a este setor. Zahler e Iglauer (2012) dividem o consumo da Pintura por processo interno, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25- Consumo de energia no processo de Pintura.



Fonte: ZAHLER E IGLAUER (2012)

Os fornos representam a maior parte do consumo da Pintura, com 31% do total, seguido das etapas de pré-tratamento e de aplicação de tintas.

## 4 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

O diagnóstico energético proposto neste trabalho segue as recomendações da ISO 50001 no item 4.4.3, ou seja, é composto pelas seguintes etapas:

1. Analisar o uso e consumo de energia com base em medições e outros dados, isto é:
  - a. Identificar as fontes de energias atuais;
  - b. Avaliar o uso e consumo de energia atual e passado.
2. Com base na análise do uso e consumo de energia, identificar as áreas de uso significativo de energia, isto é:
  - a. Identificar as instalações, equipamentos, sistemas, processos e pessoal trabalhando para a organização ou em seu nome que afetam significativamente o uso e consumo de energia;
  - b. Identificar outras variáveis relevantes que afetam os usos significativos de energia;
  - c. Determinar o desempenho energético de instalações, equipamentos, sistemas e processos relacionados aos usos significativos de energia identificados e
  - d. Estimar o uso e consumo de energia futuros.
3. Identificar, priorizar e registrar oportunidades de melhoria do desempenho energético.

A fábrica onde foi realizado o estudo de caso está localizada na cidade de Goiana, Zona da Mata Norte de Pernambuco (Figura 26). Ela pertence a uma das dez maiores marcas de automóveis no mundo e tem capacidade de produzir 250.000 veículos por ano em até quatro modelos diferentes. Atualmente, três são produzidos: dois SUVs e uma pick-up grande. Em 2016, a produção total foi de 122.513 veículos. O regime de trabalho é dividido em três turnos, sendo um deles (entre 1h10 e 06h00) destinado à manutenção.

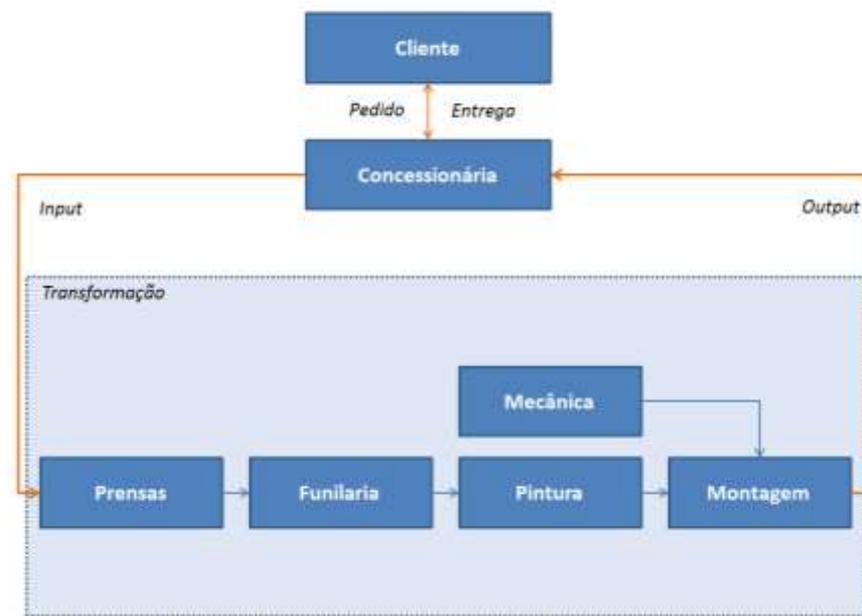
A fabricação do automóvel é dividida em quatro principais etapas, localizadas em diferentes áreas: Prensas, Funilaria, Pintura e Montagem. A fabricação das partes mecânicas (inseridas na Montagem) não é realizada na planta em análise. O fluxo do processo é mostrado na Figura 27. Na Figura 28 é ilustrada a localização de cada área dentro do perímetro da planta estudada.

Figura 26- Localização do município de Goiana em Pernambuco



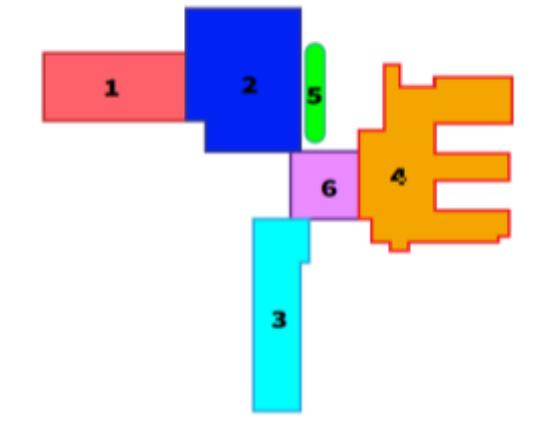
Fonte: Agência de Desenvolvimento de Goiana

Figura 27- Fluxo do processo de fabricação do automóvel.



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 28- Layout da fábrica estudada: 1) Prensas; 2) Funilaria; 3) Pintura; 4) Montagem; 5) Energy Center; 6) Centro administrativo



Fonte: Elaborada pela autora

Nas Prensas, bobinas de aço são cortadas e moldadas para formar as peças da carroceria (Figura 29). A primeira linha é a de corte, da fabricante Schuler. As duas linhas de estampagem são da Komatsu, que transformam as chapas em capôs, tetos, portas e demais partes do automóvel.

Figura 29- Bobina de aço sendo cortada.



Fonte: FCA Latam (2015)

Em seguida, as peças são armazenadas num depósito, de onde seguem para a Funilaria. Nesta etapa, as peças são soldadas em cerca de três mil pontos, formando a carroceria do carro. Os processos de solda são realizados de forma automatizada por mais de seiscentos robôs da Comau (Figura 30). Além dos pontos de solda, também são aplicados adesivos estruturais.

O processo de pintura é composto por quatro principais passos: pré-tratamento, cataforese (Figura 31), colocação de sigilatura para impedir entrada de ar, água e ruídos e aplicação de tinta e de verniz. O design operacional é da Geico Taikisha.

Figura 30- Aplicação de pontos de solda em uma das linhas da Funilaria.



Fonte: FCA Latam (2015)

Figura 31- Etapa de cataforese na Pintura.



Fonte: FCA Latam (2015)

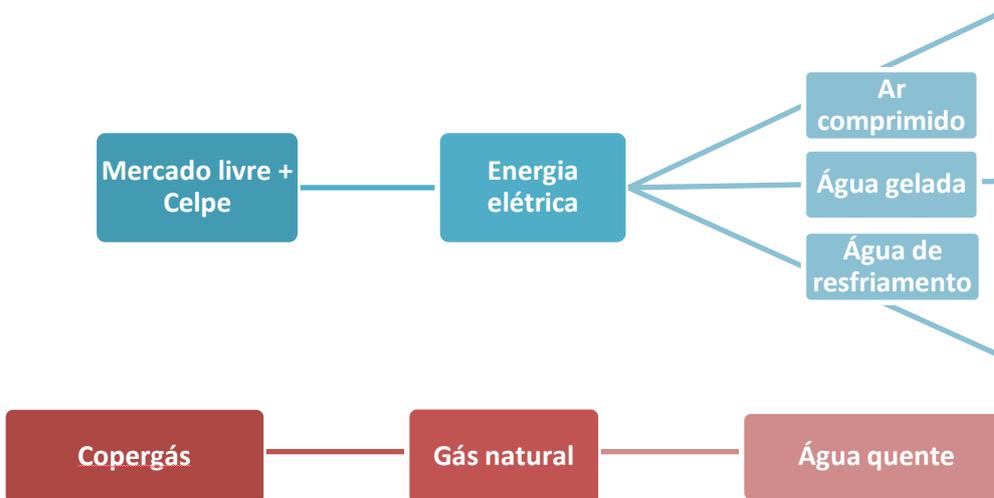
Na Montagem são inseridos o motor, os vidros, os bancos e os demais acessórios do carro. É nesta etapa que há mais processos manuais. Após estes quatro setores, o carro passa por testes de qualidade na própria fábrica e em seguida é encaminhado para as concessionárias.

Além das quatro áreas produtivas, têm-se os setores auxiliares: áreas administrativas, restaurantes, ambulatório, portarias, área de recebimento de materiais, a ETE (estação de tratamento de efluentes), a Ilha ecológica (reciclagem e reaproveitamento de resíduos) e o Energy Center. Este último é o responsável pelo controle da aquisição, transformação e distribuição dos vetores energéticos para os usuários finais da planta, bem como manutenção e operação das centrais de transformação. Os dados de consumo analisados foram obtidos neste setor, por meio de visitas e entrevistas.

#### 4.1 ANÁLISE DOS USOS E CONSUMOS DE ENERGIA

Os vetores primários utilizados na planta são energia elétrica, gás natural, óleo diesel, gasolina, álcool e gás liquefeito de petróleo (estes últimos para frota interna de veículos e geradores elétricos). A partir da energia elétrica são produzidos água gelada, ar comprimido e água de resfriamento. O gás natural é fonte para produção de água quente (Figura 32).

Figura 32- Vetores primários e secundários da planta em estudo.



Fonte: Elaborada pela autora

A energia elétrica é adquirida no mercado livre<sup>2</sup> desde agosto de 2016, sendo a distribuição realizada pela concessionária local, a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). O consumidor enquadra-se na categoria A3 Azul, ou seja, é atendido a 69 kV e compactua com a concessionária os valores pagos nos horários de ponta e fora ponta. A Companhia Pernambucana de Gás (COPERGÁS) é responsável pela distribuição do gás natural. Algumas características do gás entregue pela companhia são mostradas na Tabela 6.

<sup>2</sup> No Brasil a comercialização de energia elétrica é realizada em dois ambientes: o de Contratação Regulada (ACR) e o de Contratação Livre (ACL). O ACL permite a livre negociação entre consumidores e comercializadores ou geradores, segundo as normas estabelecidas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Tabela 6- Características do gás natural entregue pela Copergás.

<b>Componentes</b>	<b>% Volumétrica</b>
<b>Metano</b>	89,24
<b>Etano</b>	7,86
<b>Propano</b>	0,24
<b>Butano e Mais Pesados</b>	0,05
<b>N2</b>	1,34
<b>CO2</b>	1,25
<b>O2</b>	0,02
<b>Total</b>	100
<b>PCS (20°C, 1 atm)</b>	9400 kcal/m <sup>3</sup>
<b>PCI (20°C, 1 atm)</b>	8500 kcal/m <sup>3</sup>
<b>Massa específica (@20°C, 1 atm)</b>	0,78 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Copergás (2017)

A energia elétrica é entregue para cada área em subestações de 13,8 kV. A única área que consome gás natural é a Pintura, onde também é gerada água quente. Os outros três vetores secundários são produzidos no Energy Center.

#### 4.1.1 Energy Center

Esta área compreende compressores e secadores de ar, chillers, torres de resfriamento e bombas de água para fornecimento.

##### a) Central de compressores

A central de compressores é responsável pela produção do ar comprimido da planta a 8,2 bar. Possui cinco compressores centrífugos, sendo três do tipo CENTAC C950 e dois do tipo CENTAC C700, além de três secadores de ar do modelo D13600INW400. É importante destacar que o resfriamento dos compressores é realizado pela água das torres de resfriamento. A capacidade instalada é para produção de aproximadamente 36.000 m<sup>3</sup>/h.

##### b) Chillers

A central de chillers é responsável por fornecer água a 6°C para as unidades de tratamento de ar localizadas acima dos galpões, que por sua vez fazem a climatização. Parte da água gelada também é utilizada na Pintura na cataforese e nas cabines de aplicação de tinta.

A central conta com nove chillers do fabricante Daikin McQuay sendo oito do modelo WDC126SSD e um do modelo WDC126VFD, onde o calor extraído para esfriar a água é dissipado nas torres de resfriamento. Todos seguem o ciclo de compressão de vapor, cujo compressor é centrífugo, e usam o R134a como refrigerante. A capacidade instalada é de aproximadamente 18.000 TR ou 63.100 kW.

#### c) Torres de resfriamento

As torres de resfriamento são responsáveis por dissipar o calor do circuito de água de resfriamento. Estão localizadas acima do prédio do Energy Center sendo no total 12 unidades do fabricante AlfaTerm. A entrada de água se dá através de bombas que elevam a água até a entrada pela parte superior da torre de onde é distribuída aos bicos aspersores. A água perdida por evaporação é restituída por um sistema automatizado de saturação que monitora ainda tendências de incrustação, corrosão e crescimento bacteriológico, dosando elementos químicos de forma ideal para o tratamento da água deste circuito. A água deixa as torres a 28°C, sendo utilizada para resfriar compressores, chillers e processos de Prensas e Funilaria.

Os vetores energéticos gerados no Energy Center são distribuídos para as áreas produtivas por dois pipe-racks (Figura 33).

Figura 33- Centro de utilidades (Energy center) e pipe racks.



Fonte: Equipe de Utilidades da FCA

#### 4.1.2 Dados de consumo

Cada subestação possui medição da energia elétrica que entra na respectiva área produtiva, e no Energy Center têm-se medidores de vazão, temperatura e pressão para os vetores produzidos. Na Pintura, há medidor de gás natural na entrada e medidores de vazão e

temperatura para a água quente. O quantitativo dos demais vetores primários (gasolina, óleo diesel, álcool e GLP) é controlado pelo setor de gestão de materiais indiretos.

Como a fábrica foi inaugurada em abril de 2015, foram analisados os valores de consumo do ano de 2016. Neste ano, a energia representou aproximadamente 13% dos custos de transformação da fábrica analisada, valor próximo da média citada por Fysikopoulos *et al.* (2012). Os consumos dos vetores primários são mostrados na Tabela 7. Energia elétrica e gás natural responderam por 92,1% da energia que entrou na fábrica. Os demais vetores representam 7,1% do consumo global. Também foram coletados os dados dos vetores secundários. Na Tabela 8 são listados os equipamentos utilizados para a produção de cada vetor e o consumo necessário durante 2016.

Tabela 7- Consumo de vetores primários em 2016

<b>Vetor primário</b>	<b>Quantidade em GJ</b>	<b>%</b>
<b>Energia Elétrica</b>	467.862	68,3%
<b>Gás natural</b>	162.985	23,8%
<b>Gasolina</b>	36.574	5,3%
<b>Óleo Diesel</b>	10.420	1,5%
<b>Alcool</b>	5.276	0,8%
<b>GLP</b>	1.763	0,3%

Tabela 8- Consumo de energia elétrica e gás natural para produção de água gelada, ar comprimido, água quente e água de resfriamento em 2016

<b>Vetor primário</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Vetor secundário</b>	<b>Quantidade GJ</b>	<b>%</b>
Energia elétrica	Chillers de compressão	Água gelada	148569	79,5%
Energia elétrica	Compressores centrífugos	Ar comprimido	18666	10,0%
Gás natural	Aquecedores de água	Água quente	18580	9,9%
Energia elétrica	Torres de resfriamento	Água de resfriamento	1102	0,6%

A água gelada é o vetor secundário que demanda maior consumo de energia elétrica. Isto se dá por dois principais motivos: a) Localização: A planta está localizada no Nordeste do Brasil, região caracterizada pelas altas temperaturas durante todo o ano, fazendo com que todas as áreas da fábrica precisem ser refrigeradas. A refrigeração é feita pela circulação de água gelada; b) Chillers: Os chillers utilizados para produção de água gelada são de compressão, tendo consumo significativo de energia elétrica. Cada equipamento consome 1.398 kW de potência.

Se os consumos por área forem divididos, encontra-se a distribuição descrita na Tabela 9. Os valores já incluem os respectivos vetores secundários, cuja participação é mostrada na Tabela 10. Os auxiliares correspondem a todas as áreas não produtivas, com exceção da área de logística e ETE, medidos separadamente.

Tabela 9- Consumo de energia por área em 2016

Área	Eletricidade (GJ)	Gás (GJ)	Total (GJ)	Participação
Pintura	188.967	154.835	343.803	54,5%
Montagem	94.241		94.241	14,9%
Funilaria	87.130		87.130	13,8%
Prensas	60.453		60.453	9,6%
Auxiliares	19.250	8.149	27.399	4,3%
Logística	16.349		16.349	2,6%
ETE	1.471		1.471	0,2%
Total	467.862	162.985	630.846	100%

Tabela 10- Distribuição do consumo de vetores secundários

Área	Água gelada	Ar comprimido	Água de resfriamento
Prensas	16%	18%	54%
Funilaria	23%	31%	46%
Pintura	30%	40%	
Montagem	31%	11%	

De acordo com dados de placa dos equipamentos instalados, 88% do consumo do Energy Center são para produção de água gelada. O restante é dividido entre compressores de ar, torres de resfriamento, bombas e demais equipamentos.

O consumo de gás natural restringe-se à Pintura e aos restaurantes, conforme Tabela 11.

Tabela 11- Distribuição do consumo de gás natural em 2016

<b>Gás natural</b>	<b>Participação</b>	<b>Energia (GJ)</b>
Pintura	95%	154835,37
Restaurantes	5%	8149,23

#### 4.2 ÁREAS SIGNIFICATIVAS

Foram estabelecidos como significativos:

1) Os dois maiores vetores energéticos, neste caso energia elétrica e gás natural, e os vetores secundários destes;

2) As áreas produtivas da planta: Prensas, Funilaria, Pintura, Montagem.

Considerou-se que a variável que influencia diretamente o comportamento do consumo de uma área produtiva é o seu produto. Ou seja: Prensas, Funilaria, Pintura e Montagem tiveram como fatores horas trabalhadas, carrocerias acabadas, carrocerias pintadas e carros, respectivamente. Para análise da planta também foi utilizado o número de carros finalizados na Montagem. Foram, então, encontrados os indicadores de desempenho para o ano de 2016, conforme Tabela 12.

Tabela 12- Indicadores de desempenho por área em 2016

<b>Área</b>	<b>Fator</b>	<b>Consumo (GJ)</b>	<b>Desempenho</b>	<b>Unidade</b>
<b>Prensas</b>	114.710	60453	0,53	GJ/hora
<b>Funilaria</b>	122.340	87130	0,71	GJ/carroceria
<b>Pintura</b>	122.217	343803	2,81	GJ/carroceria pintada
<b>Montagem</b>	122.513	94241	0,77	GJ/carro
<b>Planta</b>	122.513	630846	5,15	GJ/carro

O valor de 5,15 GJ/carro considera também as áreas auxiliares da planta. O número é inferior aos mostrados na Figura 24 (item 3.5) para diversas empresas do setor, com exceção

da Hyundai. Dehning (2017) afirma que outros fatores além do consumo devem ser levados em consideração para comparar diferentes plantas, como taxa de utilização, dias de aquecimento e/ou refrigeração e tamanho dos carros produzidos. No entanto, estas variáveis não foram consideradas neste estudo.

Não há previsão de inclusão de cargas significativas em nenhuma das áreas, logo, a participação de cada uma deveria se manter em 2017.

Conforme verificado na bibliografia a Pintura é, de fato, o maior consumidor de energia da organização. Neste caso, ela é responsável por 54,5% do total. Por este motivo, após a análise do ano base 2016 para a planta, os três primeiros meses de 2017 foram dedicados ao estudo desta área de forma mais profunda de modo a priorizá-la nas propostas dos projetos de melhoria.

### 4.3 PINTURA

A Pintura é dividida em quatro unidades técnicas elementares (UTES):

- UTE 1: Pré-tratamento e Cataforese;
- UTE 2: Aplicação de sigilatura;
- UTE 3: Cabine de pintura e
- UTE 4: Revisão final.

Além destas, pode-se citar ainda a ventilação do galpão e a iluminação, consideradas cargas separadas. Na planta analisada, diferentemente de outras fábricas automotivas, não há aplicação de primer. Além disso, a tinta é a base de água e os fornos possuem sistema de recirculação do ar. Estes pontos já implicam no menor consumo de água e de energia em relação a plantas tradicionais.

#### *UTE 1*

A UTE 1 é composta pelo pré-tratamento (PT) e a cataforese (ED). O pré-tratamento é a primeira linha de produção dentro da Pintura. Seu objetivo é limpar e preparar a carroceria para a aplicação da cataforese. Para isto, a carroceria é submetida a uma série de tratamentos de aspersão e imersão em soluções compostas por água e produtos químicos (Figura 34).

Figura 34- Estágios do pré-tratamento na Pintura



Fonte: Elaborada pela autora

No estágio 0, tubos posicionados em ambos os lados enviam uma grande quantidade de solução de limpeza às partes internas da carroceria, removendo contaminantes e óleos provenientes da Funilaria. Em seguida, no estágio 1, ocorre o desengorduramento por aspersão, para remoção de óleo e contaminantes na superfície externa. A limpeza da carroceria é completada através da imersão em um tanque de solução alcalina, no estágio 2. Ambas as superfícies interna e externa são tratadas nesta fase. Após a limpeza realizada nas fases anteriores, a carroceria é enxaguada para remover qualquer resíduo de produtos químicos desengordurantes e contaminantes (estágios 3 e 4). No estágio 5 é criado um depósito de microcristais que serão utilizados para facilitar a formação da camada de fosfato na etapa seguinte, fundamental para boa adesão da camada de pintura por cataforese. As fases de enxágue (estágios 7 e 8) são muito importantes para evitar a contaminação. Não é necessário controle de temperatura. A passivação (estágio 9) tem como objetivo reparar as áreas da carroceria onde a camada fosfática ainda não foi completamente formada, aumentando a resistência contra a corrosão. Após o tratamento de passivação a carroceria é enxaguada mais uma vez por imersão (estágio 10), dentro de um tanque de água desmineralizada. No estágio 11 a carroceria passa por uma troca de inclinação para facilitar a drenagem da água da etapa anterior.

Os estágios 0, 1, 2 e 6 são aqueles que precisam de temperatura mais alta que a temperatura ambiente (entre 50 e 60°C), e por isso, trocam calor com o circuito de água quente em trocadores de placas. Este circuito, por sua vez, é mantido por dois aquecedores de água, de 3500 kW de potência cada. Ambos podem operar contemporaneamente (em caso de máxima demanda térmica) ou singularmente e são alimentados por gás natural. Cada

equipamento (Figura 35) tem capacidade para aquecer 150 m<sup>3</sup>/h de água de 70°C para 90°C. A temperatura de projeto dos gases expelidos é de 180°C.

Figura 35- Aquecedor de água na Pintura



Fonte: Elaborada pela autora

Após o pré-tratamento a carroceria parte para a cataforese, onde ocorre a aplicação da primeira camada de tinta pelo princípio da eletrodeposição. A eletroforese de partículas carregadas positivamente (cátions) é chamada cataforese, consistindo no deslocamento para o cátodo. Este processo consome água gelada para manter sua estabilidade.

Em seguida, a carroceria passa por um forno (Forno ED). Este tem como objetivo cozer a tinta de cataforese na carroceria antes da aplicação das próximas camadas. O aumento de temperatura da carroceria é feito gradualmente, pois choques térmicos são danosos à qualidade do processo. A temperatura alvo é de cerca de 170 °C.

## *UTE 2*

A sigilatura é um material cuja função é vedar a carroceria em relação a água e ruídos e é aplicada de forma manual ou automática, dependendo do local de aplicação. A aplicação manual ocorre nas estações de trabalho, chamadas de working decks. O termo “working deck” é empregado para definir todas as cabines nas quais são realizadas as operações auxiliares de pintura, como a aplicação de sigilatura e a inspeção final. Todas as cabines são fechadas, ventiladas por uma unidade de fornecimento de ar (ASU – Air Supply Unit) que funcionam utilizando troca de calor com a água gelada. No caso desta planta, a Pintura possui 5 working

decks. Após a aplicação de sigilatura na carroceria, a mesma passa por mais um forno, cuja temperatura chega a 160°C.

### *UTE 3*

Na UTE 3 são aplicados a tinta base e o verniz à carroceria. Estes processos ocorrem nas cabines de aplicação, que têm a função de criar o ambiente correto evitando a entrada de contaminantes e a saída de tinta por aspersão. A temperatura deve ser mantida a 24,5°C e a umidade a aproximadamente 70%. Estes parâmetros são controlados também por ASUs, porém, estas utilizam água gelada (para retirar a umidade) e gás natural (para controle da temperatura).

Antes de entrar na cabine base, a carroceria deve ser limpa para que seja removido o pó acumulado. Após este processo, é feita a aplicação das camadas da base nas superfícies externa e interna das carrocerias (BC1). Em seguida, mais uma camada de base é aplicada na superfície externa das carrocerias (BC2). Após a aplicação da base, a tinta deve ser aquecida e permanecer em uma temperatura de 65°C para permitir a evaporação parcial da água contida na fórmula. O ar seco torna a evaporação da água da camada de tinta mais eficiente, reduzindo a temperatura requisitada pelo forno.

Depois que parte da água da base evapora, as carrocerias entram na cabine de verniz transparente para as últimas aplicações de tinta. Para evitar a contaminação por excesso de aspersão, cada área de aplicação é separada das outras mediante cortinas de ar. O último forno, o Top coat, é contínuo e em linha. São duas unidades em paralelo, onde a temperatura da carroceria chega a 140°C.

Além destas, pode-se citar ainda a UTE 4, onde ocorre a revisão final da carroceria.

Nos quatro fornos (ED, Sigilatura e dois Top coat), a transferência de calor é realizada por convecção forçada através da recirculação do ar quente. Para isto, eles são equipados com unidades de aquecimento que movimentam, aquecem e filtram o ar.

Na entrada e na saída dos fornos encontram-se as unidades de ar fresco, que têm a função de proporcionar a troca de ar necessária à cavidade interna do forno. Geram também uma barreira de ar quente para limitar o calor liberado nas aberturas.

Os fornos ED e Top coat possuem incineradores (ITO) integrados que aquecem tanto os fornos quanto algumas unidades de aquecimento com queimador específico. O forno de sigilatura possui apenas unidades de aquecimento com respectivo queimador.

No primeiro caso, o ar extraído do forno é enviado ao ITO e levado à temperatura de incineração (730°C). O ar, antes de entrar no incinerador, é pré-aquecido a 450°C, passando por vãos ao redor da câmara de combustão. A combustão leva o fluxo de ar de 450°C a 730°C, queimando as partículas de solventes na geração do aquecimento. O ar limpo e o restante do calor são descarregados na atmosfera através da chaminé. O fluxo de ar quente passa através das unidades de aquecimento do forno antes de sair.

#### 4.3.1 Vetores energéticos da Pintura

O consumo dos vetores energéticos da Pintura é mostrado na Figura 36 em TJ, para o período de janeiro a março de 2017. Os números para água gelada e ar comprimido correspondem à energia elétrica consumida para a produção de ambos no Energy Center.

O gás natural representa o maior percentual do consumo de energia, com 43% do total. A energia necessária para produção de água quente representa em média 12% deste valor. Se considerarmos os custos (R\$ 52,90/GJ para energia elétrica e R\$ 34,68/GJ para gás), a energia elétrica se torna a mais representativa (Figura 37).

Figura 36- Consumo de energia (TJ) e produção na Pintura entre janeiro e março de 2017

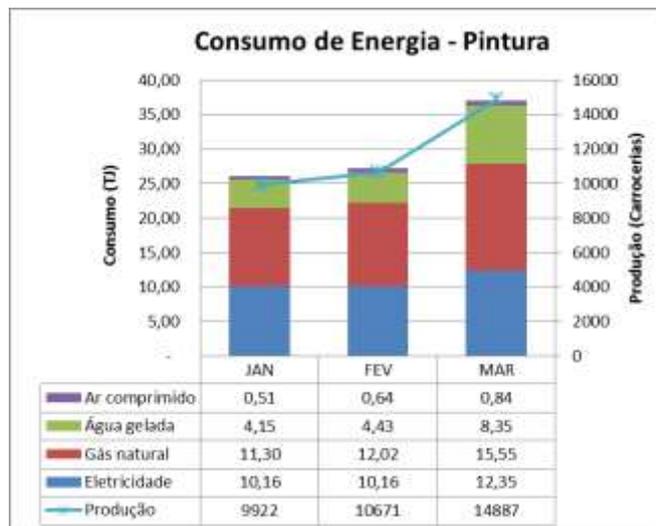
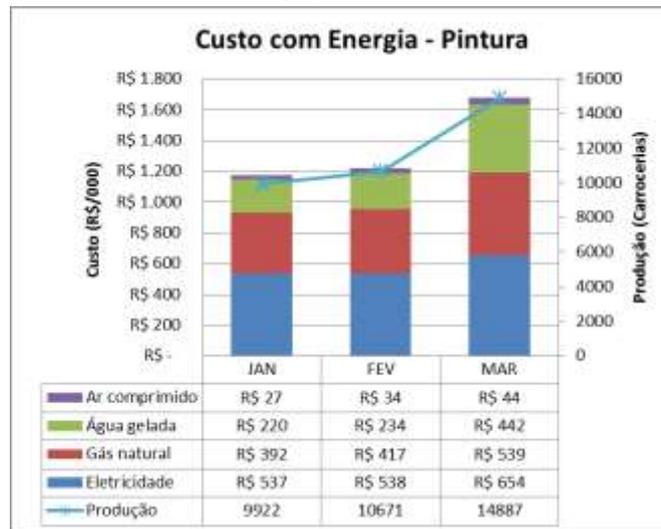


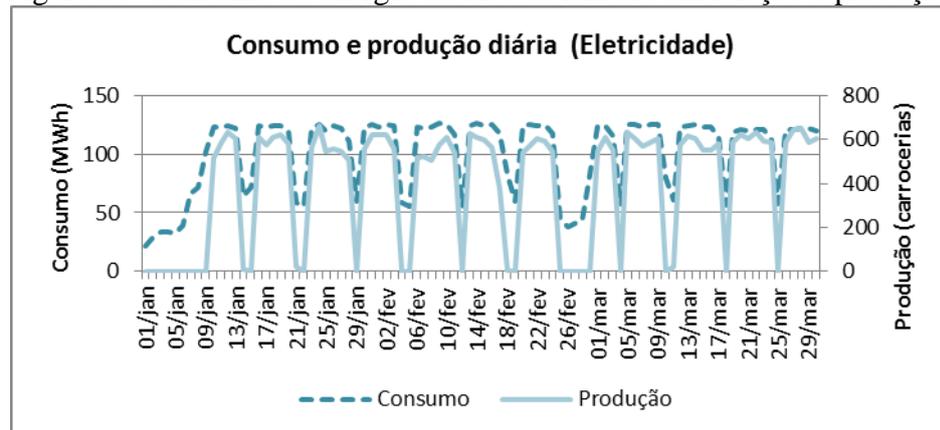
Figura 37- Custo com energia (R\$/000) e produção na Pintura entre janeiro e março de 2017



### *Energia elétrica*

A potência instalada na Pintura é de 11970 kW, no entanto, durante o período analisado, este valor se manteve em torno de 6047 kW nos dias produtivos. O comportamento diário do consumo de energia elétrica em relação à produção de carrocerias pintadas pode ser visto na Figura 38.

Figura 38- Consumo de energia elétrica da Pintura em relação à produção



Em dias produtivos, o número de carrocerias foi de 500 a 660 carros. Para este intervalo, o consumo se manteve em torno dos 122 MWh. Isto ocorre pois a Pintura é composta por processos que devem se manter ligados, mesmo que haja variação no número de

carros produzidos. Os fornos e as cabines de pintura, por exemplo, devem ser mantidos sempre a condições exatas de temperatura e umidade para não afetar a qualidade do veículo.

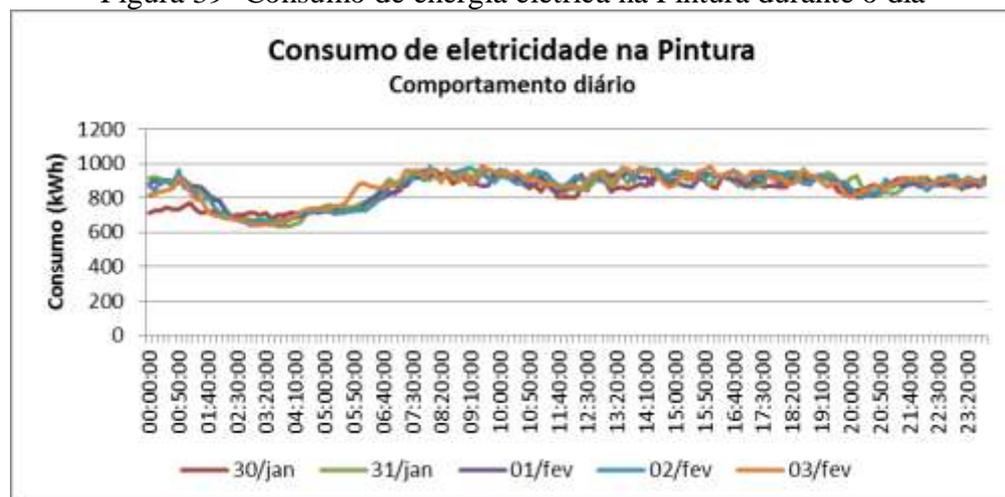
Em dias em que não há produção o consumo médio foi de 56 MWh, ou seja, quase metade do consumo que ocorre em um dia de trabalho. O alto consumo pode ser justificado pois:

- a) não há procedimento operacional para desligamento dos equipamentos;
- b) considera-se como produção apenas os carros prontos (que saem da Pintura), sendo que algumas UTEs podem operar durante fins de semana e feriados para suprir alguma demanda extra e
- c) atividades de manutenção que precisam ser realizadas quando não há produção podem requerer o funcionamento de algumas linhas.

O desempenho apresentado para este período na Pintura foi de 0,92 GJ/carroceria para energia elétrica.

Como o medidor utilizado armazena medições a cada 10 minutos, foi possível ainda avaliar o comportamento do consumo durante o dia. Visto que este não variou de forma significativa de janeiro a março, utilizou-se a semana entre 30/01 e 03/02 como representativa (Figura 39).

Figura 39- Consumo de energia elétrica na Pintura durante o dia



Percebe-se que durante o terceiro turno há apenas uma leve diminuição no consumo, o que mostra que ainda há um alto potencial de melhoria durante este intervalo.

A Pintura possui cerca de 80% dos pontos de energia elétrica medidos internamente, e a partir deles, é possível verificar os setores de maior consumo (Tabela 13). As UTEs 1 e 3 representam a maior parte do consumo deste vetor, principalmente devido à cataforese, cabine de pintura e fornos.

Tabela 13- Distribuição do consumo de energia elétrica na Pintura

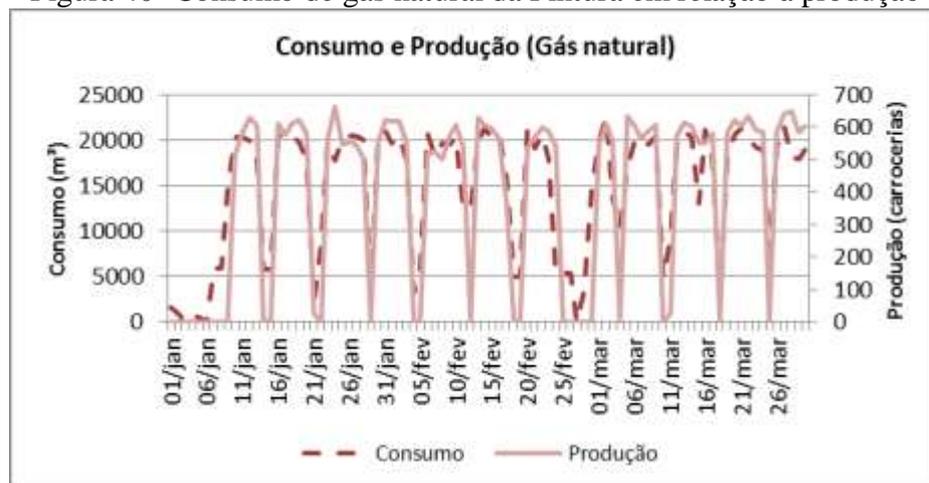
UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	Ventilação	Iluminação
38%	11%	35%	3%	8%	4%

### *Gás Natural*

Os consumidores de gás natural são os aquecedores de água, as unidades de tratamento do ar das cabines de aplicação e os fornos. Somados, correspondem a uma potência instalada de 20604 kW. No entanto, durante o estudo, a potência e o consumo médio de gás encontrados durante os dias produtivos foram de 7891 kW e 19169 m<sup>3</sup> (20°C, 1 atm), respectivamente.

O comportamento diário do consumo de gás natural em relação à produção de carrocerias pintadas pode ser visto na Figura 40.

Figura 40- Consumo de gás natural da Pintura em relação à produção



O gás natural apresentou uma parcela fixa de consumo inferior à da energia elétrica. Em dias não produtivos, a média de consumo foi de 5094 m<sup>3</sup>, ou seja, 27% do quantitativo de um dia trabalhado. Este consumo é justificado pelos mesmos fatores descritos para a energia elétrica.

O desempenho energético apresentado para o gás natural na Pintura entre janeiro e março de 2017 foi de 1,32 GJ/carroceria. O percentual de consumo de cada área interna é mostrado na Tabela 14.

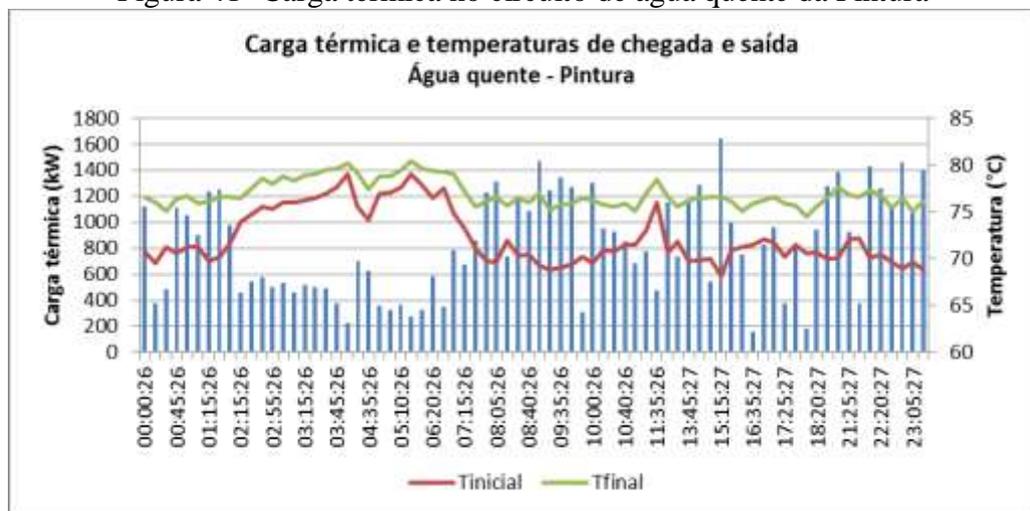
Tabela 14- Distribuição do consumo de gás natural na Pintura

UTE 1	UTE 2	UTE 3
48%	17%	35%

A oficina possui medidores de gás em cada queimador existente, com exceção do queimador dos aquecedores de água. Estes têm o consumo estimado através da vazão de água aquecida e diferença de temperaturas antes e depois, sendo incluso na UTE 1.

Na Figura 41 é possível verificar a variação da carga térmica com as temperaturas em um dia de produção. O valor máximo atingido foi de 1647 kW, menos da metade da capacidade de um aquecedor, de 3500 kW. A partir desse valor, o consumo de gás estimado foi de 2367 m<sup>3</sup>/dia (o equivalente a 13,3% do total).

Figura 41- Carga térmica no circuito de água quente da Pintura

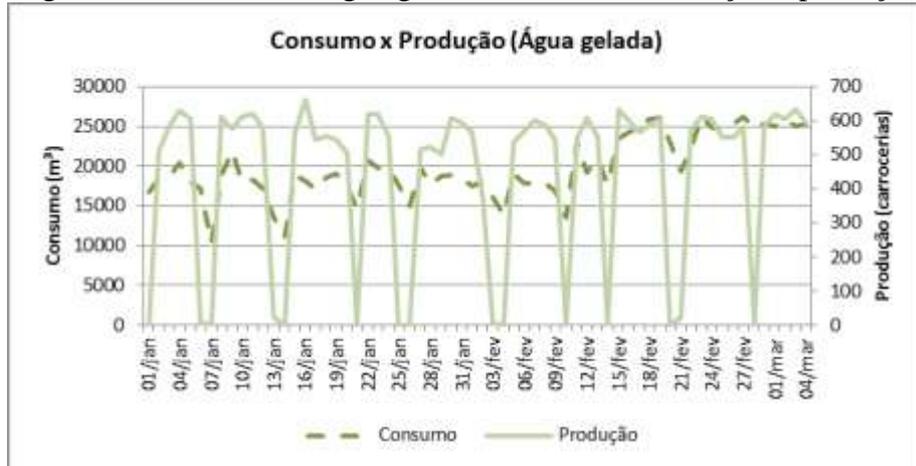


### *Água gelada e ar comprimido*

Água gelada e ar comprimido são enviados pelo Energy Center, de onde foram coletados os dados.

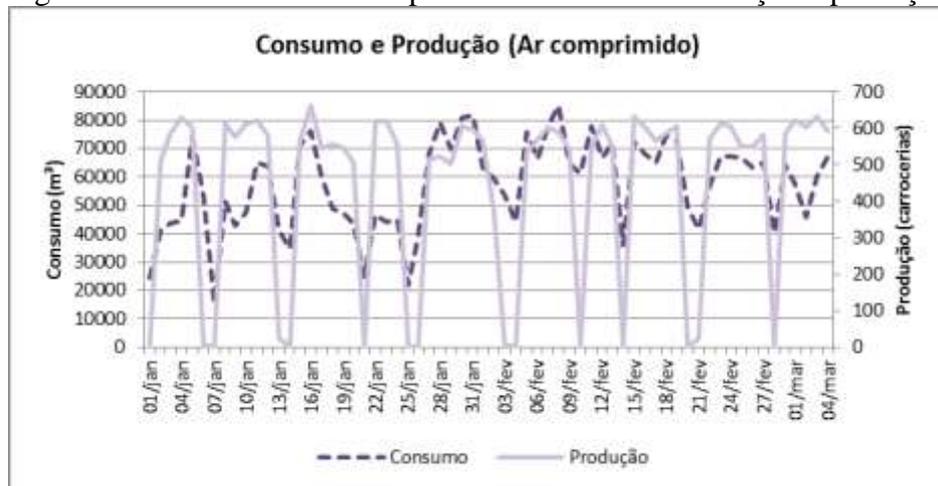
A água chega à Pintura a aproximadamente 6,6°C e retorna a 11,6°C. Ela é consumida principalmente no controle de temperatura das cabines de aplicação de tinta (70%) e na cataforese (16%). A capacidade instalada de projeto é 12382 kW, porém, a carga térmica no período da análise ficou em torno de 5060 kW. A entrega de água gelada é mostrada na Figura 42.

Figura 42- Consumo de água gelada da Pintura em relação à produção



O ar comprimido é gerado a 8,2 bar e a maior parcela entregue também vai para as cabines (em média, 88%). Esta pressão é considerada alta se comparada a de outras fábricas do mesmo segmento, que trabalham a aproximadamente 6 bar. Isto se deve ao tipo de atomizador existente no sistema, o Ecobell2 da Durr. O consumo de ar comprimido é mostrado na Figura 43.

Figura 43- Consumo de ar comprimido da Pintura em relação à produção



Os gráficos mostram que os consumos destes dois vetores apresentam pouca variação. As reduções apresentadas para água gelada e ar comprimido foram de apenas 22% e 38%, respectivamente. Isto significa que há oportunidade de melhoria no controle destes insumos, de forma que a demanda se adeque melhor à produção.

#### 4.4 IDENTIFICAR, PRIORIZAR E REGISTRAR OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Após visitas, entrevistas e análises dos dados de consumo e das instalações da fábrica, foram identificadas oportunidades de melhoria do desempenho energético. Como a Pintura foi a área de maior representatividade nos custos relacionados à energia na planta analisada, foi o foco de várias das ações. A lista de atividades sugerida a seguir tem como referência Galitsky e Worrell (2008).

A primeira e principal recomendação seria a implementação de um sistema de gestão de energia completo. O diagnóstico energético é apenas uma das etapas necessárias descritas na norma ISO 50001. O sistema contribui para a criação de uma política organizacional energética, definição de indicadores de desempenho, execução de planos de ação, monitoramento e medição de vetores e áreas significativas, controle de não-conformidades e constante avaliação dos membros diretivos.

Uma gestão eficiente contribui para a identificação e controle das perdas, como o alto consumo fixo encontrado na Pintura. Conforme mostrado na Figura 39, há potencial de redução com maior desligamento no 3º turno, já que ele não é produtivo. Alguns setores da área devem permanecer ligadas, como bombas da UTE 1 para manter a homogeneidade dos tanques, a sala de armazenamento de tintas e a iluminação de segurança, no entanto, estas cargas não são altas. Logo, todos os demais setores da área podem ser desativados. Além disso, foi verificado que não havia procedimento de desligamento no fim do segundo turno (1h10) e que o início do primeiro turno poderia estar ocorrendo antes do necessário, às 4h00.

O ar comprimido não pode ser totalmente fechado devido a atividades de manutenção, porém, sua pressão pode ser reduzida, o que diminuiria o consumo de energia elétrica no Energy Center. Além disso, a geração de todo o ar comprimido da fábrica é feito a 8,2 bar visando a Pintura. É provável que com a instalação de um booster para elevar a pressão apenas no ponto de uso, a pressão na geração poderia passar para 6 bar.

É possível ainda reduzir o consumo fixo por meio da adequação do fluxo de água gelada nas unidades de tratamento de ar: com a utilização de válvulas automáticas, seria possível permitir a passagem apenas do fluxo necessário nos trocadores de calor.

Ainda na Pintura, é possível eliminar o uso de um dos aquecedores de água, visto que a capacidade de apenas um dos equipamentos já consegue suprir a demanda existente. Adicionalmente, é necessário melhorar o controle da combustão em todos os queimadores: não há monitoramento da eficiência de combustão, ou seja, pode estar havendo excesso ou falta de ar causando maior consumo de gás natural.

Os fornos existentes no processo possuem eliminação de gases para a atmosfera: somando-se todas as chaminés, a vazão chega a 83800 kg/h (ou 23 kg/s), com uma temperatura média de 154°C, conforme mostra a Tabela 15. A partir destes valores, encontra-se uma potência térmica de 2980 kW disponível.

A energia residual térmica perdida poderia ser utilizada, por exemplo, para aquecimento da água quente ou ainda para produção de água gelada com o uso de chillers de absorção. Estas alternativas serão estudadas no capítulo 5.

Tabela 15- Fornos da Pintura e respectivas vazões e temperaturas dos gases de exaustão

<b>Forno</b>	<b>Saída</b>	<b>Vazão (kg/s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
ED	ITO 1	4,72	148
ED	ITO 2	4,72	148
Sealer	Extração 1	3,58	165
Sealer	Extração 2	3,58	165
Top Coat A	ITO A	3,33	152
Top Coat B	ITO B	3,33	152

## 5 ESTUDO DE RECUPERAÇÃO DE CALOR E COGERAÇÃO

A partir das constatações feitas na execução do diagnóstico energético, foram analisadas outras formas de operar energeticamente a planta:

- Modificações no sistema de aquecimento de água;
- Inserção de turbina a gás para geração de energia elétrica e aquecimento da água com os seus produtos de combustão;
- Inserção de chiller de absorção para produção de água gelada com resíduos térmicos.

Os estudos foram conduzidos mediante simulações dos processos com o software EBSILON®Professional (versão 12.04) distribuído pela STEAG GmbH.

### 5.1 SOFTWARE: EBSILON®PROFESSIONAL

O EBSILON®Professional é um software comercial de simulação de plantas. O seu objetivo é calcular as variáveis termodinâmicas (entalpias, pressões, etc) e fluxos de massa para os ciclos desejados.

O programa contém bibliotecas para diversos materiais, incluindo:

- Água/vapor
- Ar/Gases de exaustão
- Combustíveis gasosos
- Combustíveis líquidos
- Combustíveis sólidos
- Água salgada
- Misturas binárias (Amônia/H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O/LiBr)
- Ar úmido

Os ciclos são projetados em uma interface gráfica com componentes dos equipamentos. Cada componente terá uma série de equações previamente configuradas, porém, é necessário especificar alguns parâmetros iniciais para o seu funcionamento.

Atualmente há 153 componentes disponíveis, divididos em 18 categorias, entre elas válvulas, tanques, turbinas, bombas, trocadores de calor, motores, câmaras de combustão e controladores.

O programa possui dois modos de cálculo: *Design* ou *Off-Design*. No primeiro caso, são construídos novos ciclos, ao serem definidas especificações para todos os componentes (utilizando dados de um fabricante, por exemplo). O modo *Off-design* armazena os dados obtidos no modo de *Design* para simular variações desejadas.

Ao iniciar uma simulação, o software usa as informações de topologia e os valores especificados nos componentes para montar um sistema de equações, o qual é resolvido iterativamente usando o método de Newton. Durante o processo de iterações, os controladores são ativados para atingir os valores configurados. O cálculo termina quando a) a mudança durante a última iteração é menor que o limite especificado ou b) o número máximo de iterações é atingido. Caso ocorram, o programa declara os erros do ciclo simulado através de avisos, indicando em qual componente está ocorrendo o problema.

Os resultados das simulações podem ser visualizados de diversas maneiras. A mais simples é ao apontar o cursor para o componente desejado. Após alguns segundos, as principais variáveis termodinâmicas são exibidas na tela. Também se pode obter estes valores ao clicar no componente ou ao inserir um campo de valor em algum ponto do ciclo. O campo mostra as variáveis escolhidas de acordo com a unidade de preferência do usuário.

Para as simulações realizadas durante este trabalho, os sistemas foram analisados na condição de regime permanente e foram consideradas variações de pressão apenas em dispositivos de compressão ou expansão. O número máximo de iterações é 999 e a precisão entre iterações é de  $10^{-7}$ .

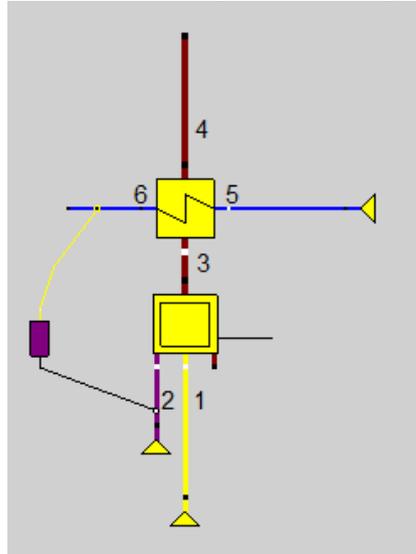
## 5.2 MODIFICAÇÕES NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

O primeiro estudo foi feito com o objetivo de reduzir o consumo de gás natural no circuito de água quente da UTE 1.

A composição do gás natural entregue pela Copergás foi inserida no software, de forma que fosse calculado o poder calorífico. O programa forneceu um valor de 11590,46 kcal/kg ou 9040,56 kcal/m<sup>3</sup> (considerando a massa específica informada de 0,78 kg/m<sup>3</sup>). Este valor é 6,3% maior que o informado pela concessionária, de 8500 kcal/m<sup>3</sup>. A razão ar/combustível estequiométrica também foi calculada pelo software.

Para a simulação do aquecedor de água, foram utilizados dois componentes do software: a câmara de combustão e o trocador de calor (Figura 44).

Figura 44- Simulação do aquecedor de água da Pintura



Considerou-se que a câmara de combustão é adiabática. O excesso de ar da combustão é inserido pelo usuário. O programa, então, considera que

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (8)$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_{p1} (T_1 - T_{ref}) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_3 c_{p3} (T_3 - T_{ref}) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_1 + \dot{m}_2 PCI_2 \quad (11)$$

Onde

$PCI_2$ : poder calorífico do gás natural

$\dot{m}_1$ : vazão de ar

$\dot{m}_2$ : vazão de gás

$\dot{m}_3$ : vazão dos gases de exaustão da câmara

Ao sair da câmara de combustão, o gás de exaustão aquece a água que vem do processo no trocador de calor. Ao inserir a diferença de temperatura entre os pontos 4 e 5

( $\Delta T$ ), ter-se-ia as seguintes equações. Para esta simulação, não foram consideradas perdas de carga nem perdas para o ambiente externo no equipamento.

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (12)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 \quad (13)$$

$$T_4 = T_1 - \Delta T \quad (14)$$

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 \quad (15)$$

$$\dot{Q}_6 = \dot{Q}_5 + \Delta \dot{Q} \quad (16)$$

onde

$\dot{m}_4$ : vazão dos gases de exaustão do aquecedor

$\dot{m}_5$ : vazão de água fria

$\dot{m}_6$ : vazão de água quente

Além da câmara e do trocador de calor, foram inseridos ainda o controlador, que serviu para que a vazão na linha de entrada de gás ocorresse de acordo com a temperatura necessária da linha de água, e o módulo de condição inicial, para inserir o valor de entrada da água no trocador de calor.

Quatro cenários foram simulados: a situação inicial (Figura 45) e três modificações (Figura 46). Primeiro foi corrigido o percentual de excesso de ar na combustão de 44% para 15% (Figura 47a), conforme recomenda a literatura (DUKELOW 1991 apud SALUM 2011, GANAPATHY 1994). Foi implementado, então, o pré-aquecimento da água que retorna do processo utilizando os próprios gases de exaustão do aquecedor (Figura 47b) e em seguida utilizando os gases de exaustão do forno mais próximo, no caso, o forno ED (Figura 47c). Conforme mostrado na Tabela 15, somando-se as duas saídas deste forno, tem-se uma vazão de 9,44 kg/s a uma temperatura de 148°C.

Figura 45- Simulação do aquecedor de água da Pintura na situação inicial

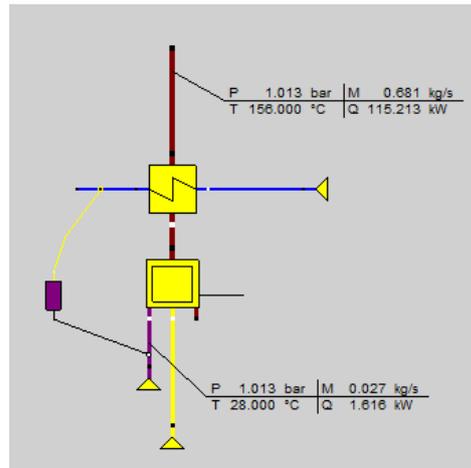
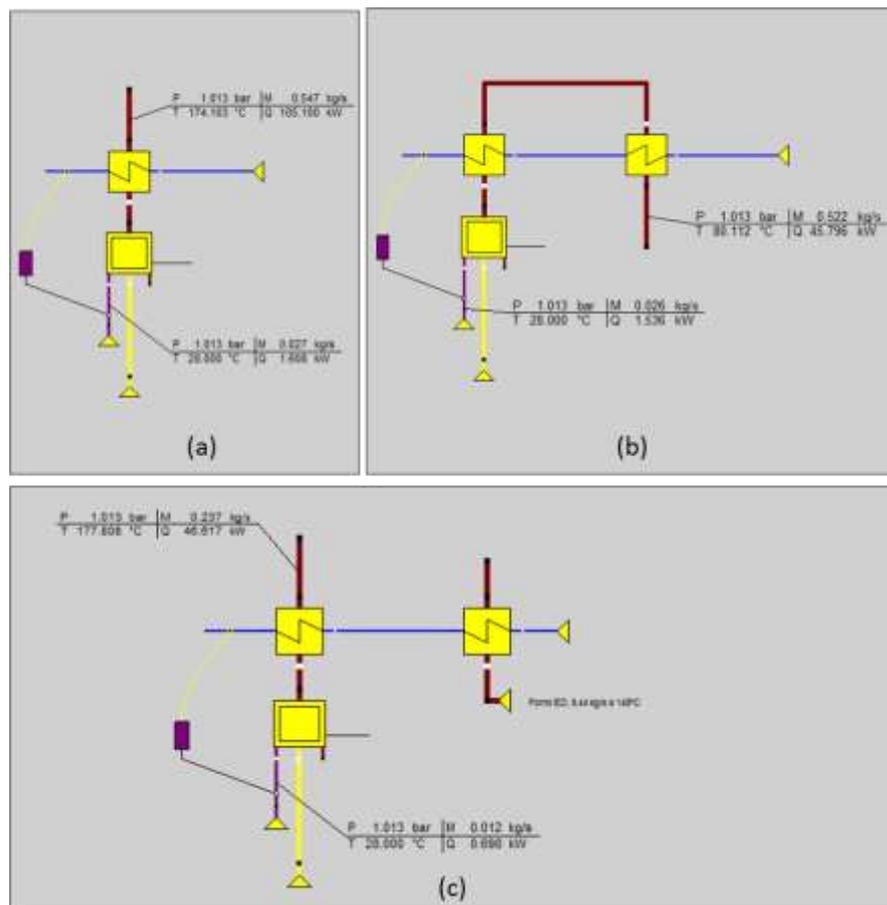


Figura 46- Simulação das alterações do sistema de aquecimento de água (a) com a correção do excesso de ar, (b) utilização dos gases do aquecedor para pré-aquecimento e (c) utilização dos gases do forno ED para pré-aquecimento.



O aquecedor de água da Pintura é ativado de acordo com a temperatura da água, que é medida por um sensor interno. O projeto inicial descreve que a água deve ser aquecida até os

90°C, mas devido à localização do sensor atual, o volume total de água sai a aproximadamente 82°C. Embora tenha uma temperatura menor que a planejada, a água consegue atender a demanda do processo e volta ao aquecedor a 75°C, sendo mantida a uma pressão de 6 bar por duas bombas.

Foi realizada avaliação dos gases de exaustão do aquecedor de água em funcionamento através de analisador de gás na chaminé, onde foram encontrados os valores de temperatura de exaustão e excesso de ar na combustão, de 156°C e 44% respectivamente.

Na simulação do aquecedor de água foram utilizadas as condições da Tabela 16.

Tabela 16- Condições de simulação do aquecedor de água

<b>Condição</b>	<b>Valor</b>
Tretorno	75 °C
Tida	82 °C
Pqueimador	1,013 bar
Tar	28 °C
Tgás	28 °C
Texaustão	156 °C
Excesso de ar	44 %
Vazão da água	150 m <sup>3</sup> /h
Pressão da água	6 bar

Na primeira simulação, da situação inicial do aquecedor, o valor de vazão de gás necessária para aquecer a água foi de 0,027 kg/s, ou, 2321,41 m<sup>3</sup>/dia. Este número é bastante próximo do real, com uma variação de 1,93%, ou seja, a simulação se aproxima bastante do processo existente.

Os resultados das demais simulações, com as modificações propostas no aquecedor de água, encontram-se na Tabela 17.

Quando foi feita a correção do excesso de ar da combustão o consumo de gás diminuiu em 11,61 m<sup>3</sup>/dia. Além disso, a temperatura dos gases de exaustão subiu de 156°C para 174°C, mais próximo do valor descrito em projeto, que foi de 180°C.

Tabela 17- Resultado das simulações no aquecedor de água

	<b>Inicial</b>	<b>Excesso de ar corrigido</b>	<b>Pré-aquecimento usando gases do aquecedor</b>	<b>Pré-aquecimento usando gases do forno ED</b>
Consumo de gás (m <sup>3</sup> /dia)	2321,41	2309,80	2211,88	1002,78
Excesso de ar (%)	44,00	15,00	15,00	15,00
Temperatura de saída dos gases (°C)	156,00	174,10	80,11	177,81

Ao realizar um pré-aquecimento da água, a redução do consumo de gás foi ainda mais significativa: no primeiro caso, com o uso da energia térmica dos gases do próprio aquecedor, o consumo de gás caiu 4,72%. Com isso, a temperatura dos gases de saída chegou a 80,11 °C. Ao empregar os gases de exaustão do forno ED como fonte de calor, obteve-se o maior ganho: o consumo chegou a 1002, 78 m<sup>3</sup>/dia.

Se forem considerados os gases de todos os fornos, ou seja, uma vazão de 23,28 kg/s e uma temperatura média de 154°C, não seria mais necessário o uso do aquecedor de água: apenas o trocador de calor conseguiria aquecer a água, que chegaria a 85,61°C (acima da temperatura atualmente utilizada).

### 5.3 TURBINA A GÁS

Conforme mencionado no item 3.4.2, o uso da geração distribuída utilizando turbinas a gás apresenta-se como uma solução técnica que pode contribuir para o aumento da eficiência energética de uma planta industrial.

Para este estudo, buscou-se aplicar uma turbina a gás que tivesse aproximadamente a mesma energia térmica residual disponível nos gases de exaustão dos fornos (2968 kW). A turbina Saturn 20 da Caterpillar chega muito próximo deste valor, com 2904 kW de projeto, porém, com temperatura de 505 °C, interessante para uso em cogeração. A potência elétrica nominal da turbina é de 1210 kW, com uma eficiência global de 24%.

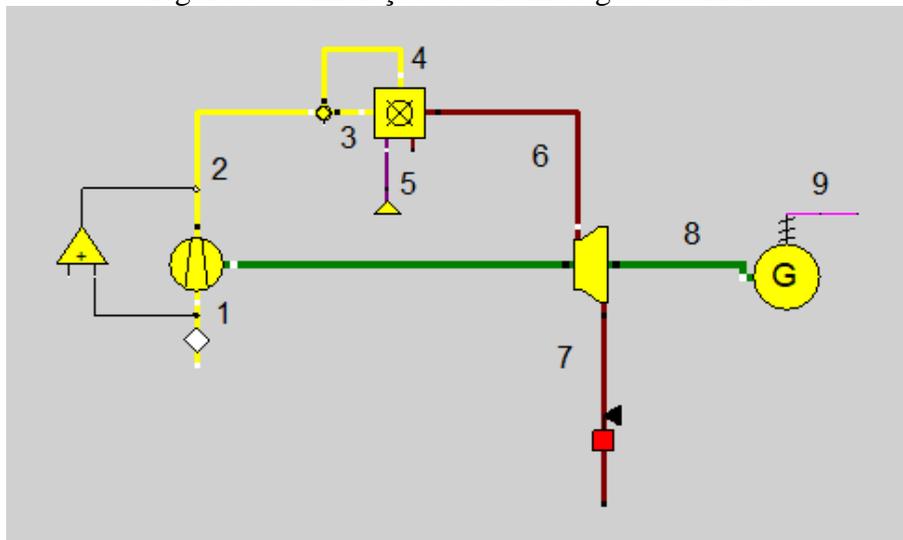
A turbina foi simulada utilizando-se os componentes já existentes no software de compressor de ar, câmara de combustão para turbina a gás, expensor e gerador elétrico. Inicialmente foram consideradas as condições de operação nominal informadas pelo fabricante, conforme Tabela 18. O esquema é mostrado na Figura 47.

Tabela 18- Parâmetros da turbina Saturn 20 para operação nominal

Parâmetro	Valor
Vazão de ar de entrada	5,8 kg/s
Temperatura do ar de entrada	15°C
Pressão do ar de entrada	1,013 bar
Razão de compressão	6,7
Taxa de calor	14795 kJ/kWh
Temperatura de exaustão	505°C
Potência	1210 kW <sub>e</sub>

Fonte: Caterpillar

Figura 47- Simulação de turbina a gás Saturn 20



Os principais componentes utilizados para esta simulação foram o compressor, a câmara de combustão de uma turbina a gás e o expensor.

A razão de compressão e as eficiências isentrópica e mecânica são inseridas pelo usuário no módulo do compressor.

$$p_2 = p_1 r_c \quad (17)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (18)$$

$$W_c = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 \quad (19)$$

Onde

$r_c$ : razão de compressão

$\dot{m}_1$ : vazão de ar que entra no compressor

$\dot{m}_2$ : vazão de ar que sai do compressor

$W_c$ : trabalho consumido pelo compressor

A câmara de combustão da turbina a gás possui entrada de ar secundária, utilizada para resfriar o ar antes da entrada na turbina. A partir do excesso de ar inserido, é utilizada a equação da combustão para encontrar a massa de combustível necessária. Considerou-se uma perda de 5% para o ambiente.

Antes da entrada do ar secundário (chamado de ponto B), tem-se que

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_3 + \dot{m}_5 PCI_5 \quad (20)$$

$$\dot{m}_B = \dot{m}_3 + \dot{m}_5 \quad (21)$$

Após a entrada de ar secundário:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_4 + \dot{m}_B \quad (22)$$

$$\dot{Q}_6 = \dot{Q}_4 + \dot{Q}_B \quad (23)$$

O expansor é o componente que representa a parte da expansão da turbina a gás. A eficiência do equipamento é fornecida pelo usuário.

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (24)$$

$$\dot{Q} = (\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7) \eta_{mecanica} \quad (25)$$

$$W_t = \dot{Q} - W_c \quad (26)$$

Neste caso  $W_t$  é o trabalho entregue pela turbina. Além dos componentes descritos acima foi ainda utilizado o gerador elétrico, cuja informação de entrada é apenas a eficiência de transformação.

Para simulação da turbina em sua condição nominal, as eficiências isentrópica e mecânica do compressor encontradas foram de 91% e 95%, respectivamente. As da turbina

foram de 90% e 95%. A eficiência de transformação do gerador elétrico foi de 98,5%. O excesso de ar e a eficiência de combustão encontrados para que a simulação tivesse um comportamento próximo dos dados do fabricante foram de 10% e 95%, respectivamente. O percentual de ar que entra na câmara na entrada secundária para resfriamento foi de 68%. Desta forma, a temperatura de saída da câmara de combustão foi de 905°C. A potência elétrica obtida foi de 1212,77 kW (um erro de 0,23% em relação a potência nominal esperada).

Em seguida, alterou-se a temperatura de entrada do ar e do gás de 15°C para 28°C, simulando o ambiente onde a turbina seria instalada. Os resultados obtidos para este cenário encontram-se na Tabela 19.

Como a temperatura ambiente é mais alta que a condição padrão do fabricante, a eficiência da turbina caiu de 24,72% para 24,14%. Isto ocorreu devido ao maior trabalho necessário no compressor para aumentar a pressão do fluido a uma temperatura maior. A potência elétrica entregue foi de 1148,36 kW, o que representa 19% da demanda média da Pintura entre janeiro e março de 2017.

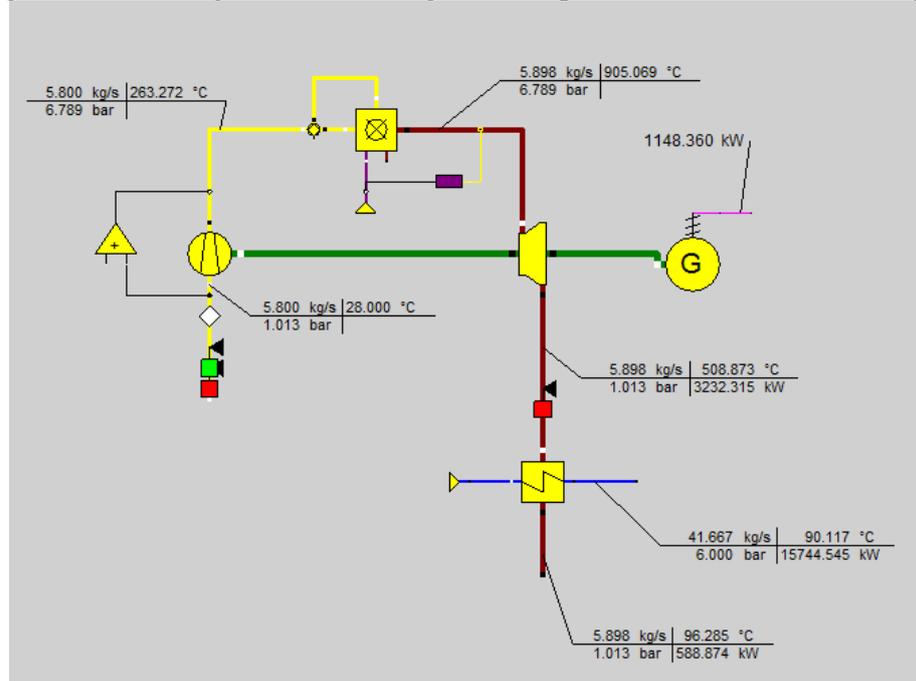
Tabela 19- Resultado da simulação da turbina a gás para as condições da Pintura

<b>Estágio</b>	<b>Descrição</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (bar)</b>	<b>Vazão (kg/s)</b>	<b>Entalpia (kJ/kg)</b>	<b>Entropia (kJ/kg.K)</b>
1	Entrada do compressor	28,00	1,01	5,80	28,14	6,87
2	Saída do compressor	263,27	6,79	5,80	267,73	6,92
6	Entrada da turbina	905,07	6,79	5,90	1017,17	7,97
7	Saída da turbina	508,87	1,01	5,90	548,03	8,04

Após a simulação da turbina, foi adicionado o componente de trocador de calor para aquecimento do circuito de água quente com os gases de exaustão (Figura 48).

Foi adotada a mesma eficiência do trocador de calor previamente utilizado na simulação do aquecedor de água (item 5.2). A temperatura de saída da água foi de 90,12°C, acima da temperatura utilizada atualmente, de 82°C. Logo, o uso da turbina conseguiria suprir parte da demanda de energia elétrica da Pintura e seus gases de exaustão teriam capacidade de substituir o uso de gás natural para aquecimento da água do processo.

Figura 48- Simulação da turbina a gás com aquecimento do circuito de água



#### 5.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÉRMICOS COMO FONTE DE ENERGIA PARA CHILLERS DE ABSORÇÃO

O uso do resíduo térmico dos fornos para o aquecedor de água reduz o consumo de gás natural na Pintura, no entanto, a energia elétrica apresenta tarifas mais elevadas. Como foi explicitado no item 4.2.2, os valores entre janeiro e março de 2017 foram de R\$ 52,90/GJ para energia elétrica e R\$ 34,68/GJ para gás. Logo, pode-se também estudar o uso da energia residual térmica em substituição à energia elétrica, neste caso, para produção da água gelada (terceiro maior vetor consumido na Pintura). Para tal, seria utilizado um chiller de absorção.

Foram analisadas duas fontes de energia para o chiller: água quente e os gases de exaustão da turbina a gás. No primeiro caso, foi utilizado um chiller de absorção de simples efeito, visto que a temperatura da água quente disponível na Pintura é baixa. Para o sistema no qual a fonte são os gases de exaustão, o chiller de duplo efeito foi aplicado.

##### 5.4.1 Água quente como fonte de energia

Conforme mostrado na Tabela 2 (item 3.4.1), a maioria dos chillers de absorção de simples efeito que utiliza água quente precisa de uma temperatura entre 90°C e 130°C para

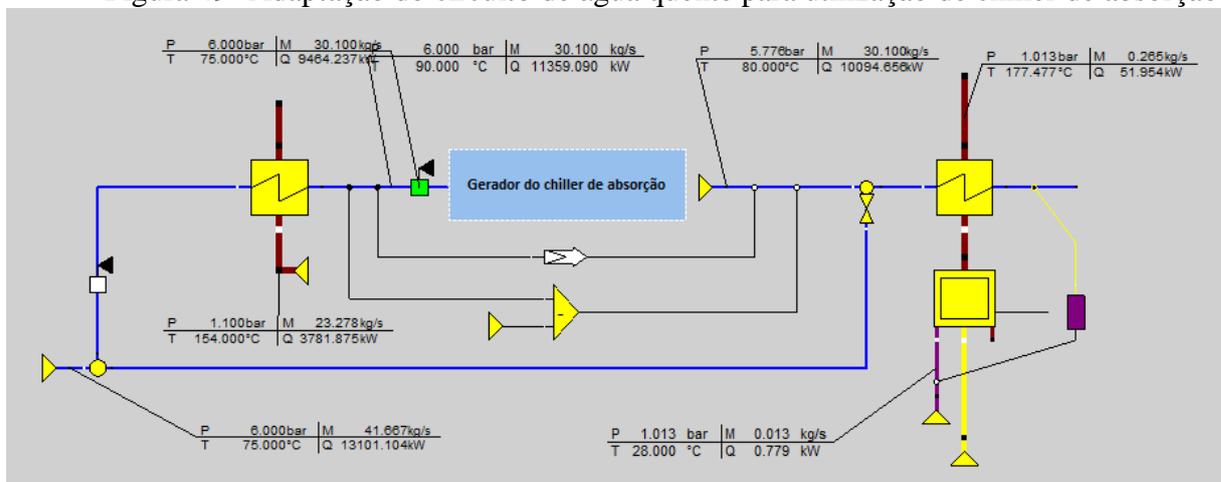
operação. A temperatura de retorno no circuito de água quente da Pintura é de 75°C. Porém, pode-se utilizar parte desta vazão para este fim caso seja aquecida.

A temperatura utilizada para a entrada da água será de 90°C. A partir deste fator, foram pesquisados chillers de absorção no mercado que atendessem a este requisito. Foi escolhido, então, o chiller de absorção modelo 16 LJ-A da Carrier como referência. Neste equipamento, a água quente entra a 90°C e sai a 80°C.

Considerou-se que a água poderia ser aquecida pelos gases de exaustão da Pintura num trocador de calor antes de entrar no chiller de absorção, conforme demonstrado que seria possível no item 5.2. Avaliando o catálogo do modelo 16 LJ-A, o modelo cuja vazão de água necessária conseguiria ser aquecida pelos gases de exaustão disponíveis seria o de 949 kW de capacidade. A vazão de água necessária é de 30,10 kg/s.

Visto que a vazão total de água no circuito de água quente é de 41,67 kg/s, seria necessária a inserção de uma válvula para desviar parte do fluxo (Figura 49). A perda de carga no chiller de absorção é a informada pelo fabricante (22,4 kPa).

Figura 49- Adaptação do circuito de água quente para utilização de chiller de absorção



Desta forma, a temperatura da água que chegaria ao aquecedor de água seria de 78,61 °C, reduzindo então o seu consumo de gás para 0,013 kg/s, ou seja, uma economia de 1201,35 m<sup>3</sup>/dia em relação ao sistema atual (51,75% de redução). Os componentes utilizados para esta simulação foram descritos no item 5.2.

Visto que a potência entregue pela água quente é de 1264 kW, foi possível então simular o chiller de absorção de simples efeito.

Os valores de entrada da simulação do chiller tomaram como referência o sistema descrito por Wang (2000) e são mostrados na Tabela 20. As temperaturas de entrada e saída da água gelada são as informadas pelo fabricante.

Tabela 20- Parâmetros de entrada na simulação do chiller de absorção de simples efeito

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura do gerador	80°C
Temperatura inicial da água gelada	12 °C
Temperatura final da água gelada	7 °C
Temperatura de saída do absorvedor	35°C
Pressão do gerador	0,065 bar
Fluido	Mistura de água e brometo de lítio
Carga térmica disponível	1264 kW

O diagrama criado do chiller de absorção de simples efeito encontra-se na Figura 50. O software já possui biblioteca de dados para a mistura de água e brometo de lítio. Os principais componentes empregados foram absorvedor, bomba, gerador, condensador, válvula de expansão, evaporador e trocador de calor, estando este último já descrito no item 5.2. Para simular uma bomba deve-se inserir o valor da pressão desejada após a mesma. O processo é considerado isentrópico. O componente da válvula de expansão calcula a temperatura após a expansão considerando a entalpia constante. A pressão após a válvula deve ser determinada externamente, assim como no caso da bomba. Os demais componentes são descritos a seguir.

O absorvedor é o local onde o vapor de refrigerante é absorvido pela solução concentrada de água/brometo de lítio. Como o vapor volta ao estado líquido, é rejeitado calor ( $Q_2$ ). A saída do equipamento é, então, uma solução diluída. O software solicita a temperatura de saída do absorvedor como informação de entrada.

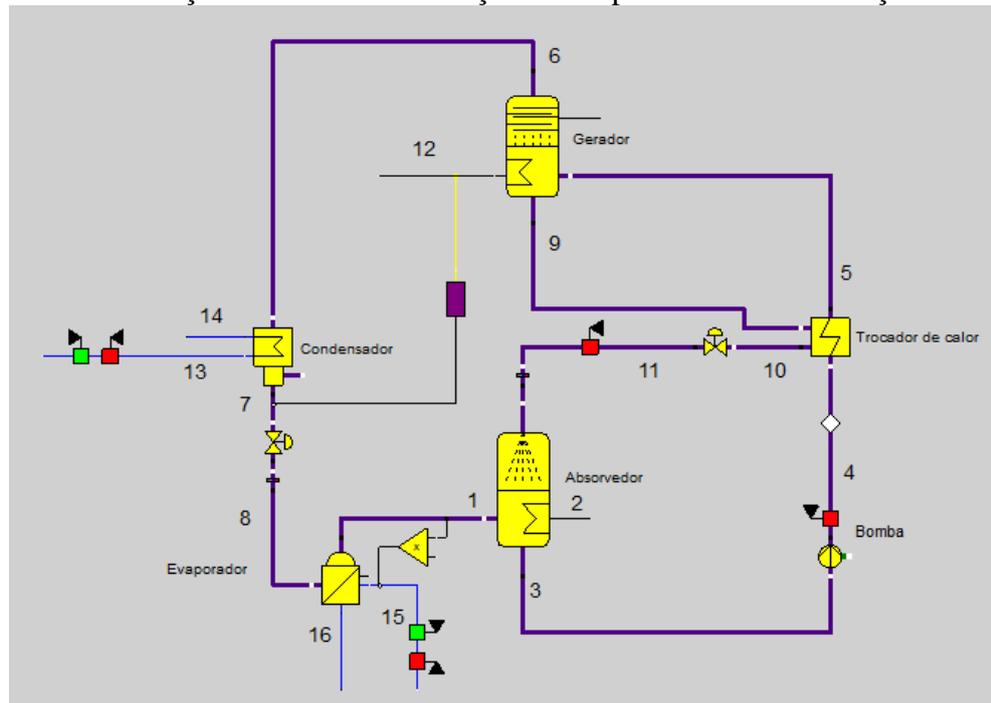
$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_3 \quad (27)$$

$$p_{11} = p_3 = p_1 \quad (28)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_3 h_3 \quad (29)$$

O gerador é o equipamento que recebe calor de uma determinada fonte e faz com que parte da água da solução diluída evapore. O vapor d'água parte em direção ao condensador enquanto a solução (agora concentrada) volta através da tubulação ao absorvedor.

Figura 50- Simulação do chiller de absorção de simples efeito nas condições nominais



O software solicita que sejam inseridos os valores de concentração de refrigerante ( $x_{16}$ ) e temperatura na saída do vapor ( $T_6$ ) no gerador. Para esta simulação considerou-se que o valor de  $x_{16}$  é 1 e  $T_6$  é  $80^\circ\text{C}$ . As equações que regem este componente são

$$\frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} = \frac{(x_{15} - x_{19})}{(x_{16} - x_{19})} \quad (30)$$

$$\frac{\dot{m}_9}{\dot{m}_5} = 1 - \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} \quad (31)$$

$$p_5 = p_6 = p_7 \quad (32)$$

$$\dot{Q}_{12} + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_9 h_9 \quad (33)$$

em que  $\dot{Q}_{12}$  é a taxa de fornecimento de calor disponível.

O módulo do condensador tem funcionamento semelhante ao do trocador de calor, porém, tem como premissa que o fluido refrigerante, neste caso, água, saia do equipamento como líquido saturado.

Ao inserir a diferença de temperatura entre os pontos 6 e 14, ter-se-ia as seguintes equações. Para esta simulação, não foram consideradas perdas de carga nem perdas para o ambiente externo no equipamento.

$$p_7 = p_6 \quad (34)$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad (35)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (36)$$

$$T_7 = f_{sat}(p_7) \quad (37)$$

$$\Delta\dot{Q} = (\dot{Q}_6 - \dot{Q}_7) \quad (38)$$

$$\Delta\dot{Q} = \dot{m}_{13}(h_{14} - h_{13}) \quad (39)$$

O evaporador é usado para vaporização de misturas binárias. Dele sai o refrigerante como vapor saturado em direção ao absorvedor. Para este componente, têm-se as equações abaixo.

$$p_{15} = p_{16} \quad (40)$$

$$p_8 = p_1 \quad (41)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} \quad (42)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_1 \quad (43)$$

$$\Delta\dot{Q} = (\dot{Q}_{15} - \dot{Q}_{16}) \quad (44)$$

$$\Delta\dot{Q} = \dot{m}_8(h_1 - h_8) \quad (45)$$

Na primeira simulação (com os dados de água gelada do fabricante), foi obtida uma capacidade de refrigeração de 944,1 kW, ou seja, um erro de 0,52% em relação a capacidade esperada (949 kW). As eficiências do gerador e do trocador de calor foram de 91% e 95% respectivamente.

Como a temperatura da água gelada utilizada na Pintura tem temperaturas de 6,6°C e 11,6°C na entrada e saída do processo foram inseridos estes valores no chiller de absorção simulado. A variação foi de apenas 0,2 kW na capacidade de refrigeração. O resultado detalhado para cada estágio do processo está na Tabela 21. O COP encontrado foi de 0,75, dentro da média no mercado.

Por meio da simulação verificou-se que com a energia térmica disponibilizada pela água quente, seria possível fornecer uma carga de refrigeração de 944,3 kW, o que corresponde a 18,66% da demanda da Pintura com água gelada entre janeiro e março de 2017.

Tabela 21- Resultado da simulação do chiller de simples efeito

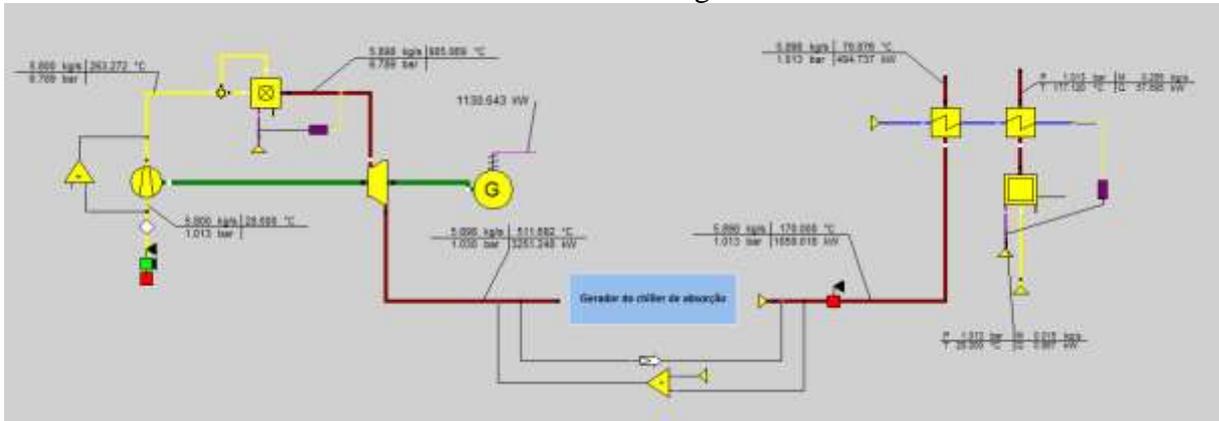
Estágio	Descrição	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão (kg/s)	Fração de refrigerante (%)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
3	Saída do absorvedor	35,00	0,01	6,23	0,45	85,06	0,22
4	Saída da bomba	35,00	0,07	6,23	0,45	85,06	0,22
5	Saída do trocador de calor (solução diluída)	71,70	0,07	6,23	0,45	163,19	0,46
9	Saída do gerador (solução concentrada)	80,00	0,07	5,83	0,41	189,03	0,47
10	Saída do trocador de calor (solução concentrada)	37,40	0,07	5,83	0,41	105,53	0,21
11	Entrada do absorvedor (solução concentrada)	37,40	0,01	5,83	0,41	105,53	0,21
6	Entrada do condensador	80,00	0,07	0,40	1,00	2649,90	8,54
7	Saída do condensador	37,63	0,07	0,40	1,00	157,63	0,54
8	Entrada evaporador	5,50	0,01	0,40	1,00	157,63	0,57
1	Entrada do absorvedor (refrigerante)	5,50	0,01	0,40	1,00	2506,88	9,00

#### 5.4.2 Gases de exaustão da turbina como fonte de energia

A segunda opção de fonte de energia para o chiller de absorção seria a utilização dos gases de exaustão da turbina a gás. De acordo com a Tabela 2 (item 3.4) é possível encontrar no mercado chillers de duplo efeito que trabalham com temperaturas entre 430°C e 660°C para gases de exaustão, intervalo onde se encontra a temperatura de saída da turbina simulada no item 5.3.

Segundo Deng, Wang e Han (2011), para evitar a condensação, a temperatura de saída dos gases de exaustão deve ficar entre 170°C e 200°C. Ainda de acordo com estes autores, devido à eliminação da necessidade de um equipamento para geração de vapor ou água quente, o chiller de absorção é integrado à planta de cogeração. Por isso, na simulação, foi configurada uma temperatura de saída dos gases do chiller de 170°C e foi considerado que a pressão após o chiller de absorção seria a atmosférica (1,013 bar). Considerando estes dados, foi possível estimar a carga térmica disponível para o chiller, conforme mostra o diagrama da Figura 51.

Figura 51- Adaptação do circuito de água quente para utilização de chiller de absorção com a turbina a gás



A potência elétrica da turbina passou a ser 1130,64 kW. Como após a passagem pelo chiller os gases ainda estão a 170°C, foi simulado também um trocador de calor para pré-aquecimento da água quente da oficina. Neste caso, a economia de gás no aquecedor foi de 1075,41 m<sup>3</sup> por dia, ou seja, uma redução de 46,32%. A carga térmica disponível para o chiller de absorção foi de 2192,23 kW.

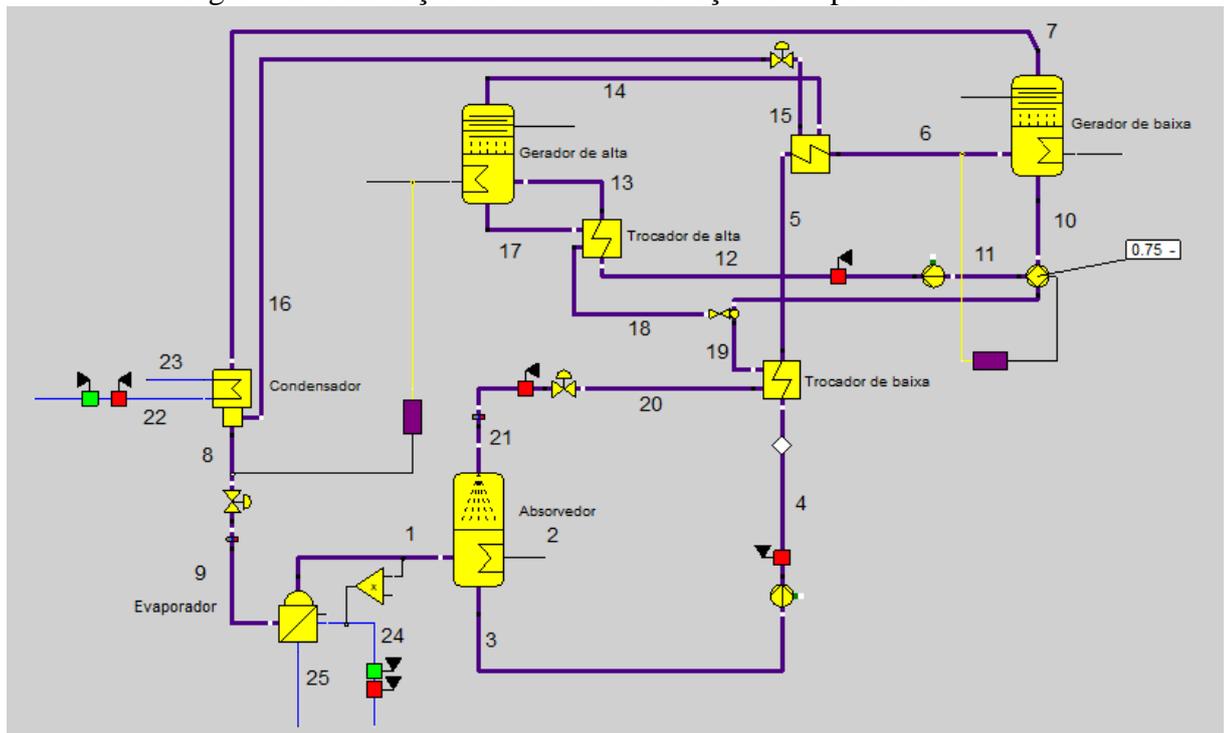
Wang (2000) afirma que o sistema de fluxo reverso paralelo é o mais eficiente energeticamente, além de oferecer design mais compacto. Foi simulado, então, um chiller de absorção utilizando LiBr-H<sub>2</sub>O, de duplo efeito e com fluxo reverso paralelo. Os parâmetros do chiller são os mostrados em Wang (2000) para um modelo típico e encontram-se na Tabela 22. As temperaturas de entrada e saída da água gelada são as utilizadas na Pintura. Se considerarmos a eficiência do gerador de alta pressão igual ao do gerador do chiller de simples efeito (91%), tem-se como entrada efetiva no chiller 1994,93 kW.

Tabela 22- Parâmetros de entrada da simulação do chiller de absorção de duplo efeito

Parâmetro	Valor
Temperatura gerador baixa pressão	80°C
Temperatura gerador alta pressão	152°C
Temperatura inicial da água gelada	11,6°C
Temperatura final da água gelada	6,6°C
Temperatura de saída do absorvedor	35°C
Pressão evaporador/absorvedor	0,00906 bar
Pressão gerador de baixa pressão	0,065 bar
Pressão gerador de alta pressão	0,52 bar
Fluido	Mistura de água/brometo de lítio

Os componentes são os mesmos do chiller de simples efeito, com exceção da válvula de três vias necessária para dividir o fluxo de solução parcialmente concentrada que sai do gerador de baixa pressão. Para simulação da transferência de calor entre o refrigerante que sai do gerador de alta pressão para o de baixa pressão foi necessário combinar um trocador de calor com um gerador, pois não havia esta opção no software. A Figura 52 mostra o diagrama criado.

Figura 52- Simulação do chiller de absorção de duplo efeito



A capacidade de refrigeração encontrada foi de 2691,2 kW, o que representa 53% da carga térmica de refrigeração necessária entre janeiro e março de 2017 na Pintura. O COP foi então de 1,35, valor esperado para este tipo de equipamento. O coeficiente maior em relação ao do chiller de simples efeito ocorre devido à utilização do calor residual do gerador de alta pressão como fonte de calor do segundo gerador. O percentual de solução parcialmente concentrada que sai do gerador de baixa pressão para o de alta pressão foi de 75%. O resultado detalhado para cada estágio do processo está na Tabela 23.

Tabela 23- Resultado da simulação do chiller de duplo efeito na Pintura

Estágio	Descrição	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão (kg/s)	Fração de refrigerante (%)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
3	Saída do absorvedor	35,00	0,01	7,97	0,45	85,06	0,22
4	Saída da bomba de baixa pressão	35,00	0,07	7,97	0,45	85,06	0,22
5	Saída do trocador de calor de baixa pressão (solução diluída)	68,50	0,07	7,97	0,45	153,74	0,43
10	Saída do gerador de baixa pressão (solução parcialmente concentrada)	80,00	0,07	7,46	0,41	189,03	0,47
12	Saída da bomba de alta pressão	80,00	0,52	5,56	0,41	189,07	0,47
13	Saída do trocador de calor de alta pressão (solução parcialmente concentrada)	128,00	0,52	5,56	0,41	285,45	0,72
14	Saída do gerador de alta pressão (refrigerante)	152,00	0,52	0,65	1,00	2783,96	7,932
15	Refrigerante de alta pressão após passar por gerador de baixa pressão	82,30	0,52	0,65	1,00	411,84	1,2917
17	Saída do gerador de alta pressão (solução concentrada)	152,00	0,52	4,91	0,33	359,92	0,74
18	Saída do trocador de calor de alta pressão (solução concentrada)	89,90	0,52	4,91	0,33	250,74	0,47
19	Entrada do trocador de calor de baixa pressão (solução concentrada)	88,50	0,07	6,81	0,36	233,54	0,47
20	Saída do trocador de calor de baixa pressão (solução concentrada)	43,70	0,07	6,81	0,36	153,10	0,23
21	Entrada do absorvedor (solução concentrada)	43,70	0,01	6,81	0,36	153,10	0,23
7	Entrada principal do condensador (refrigerante do gerador de baixa pressão)	80,00	0,07	0,51	1,00	2649,90	8,54
16	Entrada secundária do condensador (refrigerante do gerador de alta pressão)	37,60	0,07	0,65	1,00	411,84	1,36
8	Saída do condensador	37,63	0,07	1,17	1,00	157,63	0,54
9	Entrada evaporador	5,50	0,01	1,17	1,00	157,63	0,57
1	Entrada do absorvedor (refrigerante)	5,50	0,01	1,17	1,00	2464,93	8,85

## 6 BENEFÍCIOS

O estudo do consumo através do diagnóstico energético contribuiu para melhor entendimento do processo atual, possibilitando a execução de algumas das melhorias sugeridas na área.

Foi realizada, por exemplo, a otimização do desligamento e do aviamento em horário não produtivo. A equipe de manutenção da Pintura estabeleceu check-lists, os quais passaram a ser executados diariamente. O consumo de energia elétrica no terceiro turno caiu cerca de 6,3 MWh por dia, o que representou 30% de redução em relação aos primeiros três meses do ano. O consumo de gás também sofreu uma redução no terceiro turno de 958,1 m<sup>3</sup>. Juntos, estes ganhos podem representar uma economia anual de R\$ 626.530,00.

O consumo de gás também foi reduzido por meio do desligamento de um dos aquecedores de água, o que fez com que o processo fosse mais bem atendido e o consumo de gás fosse reduzido. A equipe da Pintura também pôde identificar que a curva de temperatura no forno Top coat encontrava-se acima do recomendado pelo fabricante e realizou a correção necessária. As curvas de temperatura dos demais fornos também foram verificadas.

Estas foram as principais ações executadas na área, que fizeram com que os indicadores de consumo apresentassem mudanças. O de energia elétrica, por exemplo, passou de 0,92 GJ/carroceria entre janeiro e março de 2017 para 0,70 GJ/carroceria entre outubro e dezembro do mesmo ano. O mesmo ocorreu para o gás natural, que foi de 1,32 GJ/carroceria para 1,08 GJ/carroceria entre o primeiro e o último trimestres de 2017. A área encerrou o ano com o indicador total de 2,12 GJ/carroceria, uma redução de 25% em relação a 2016.

No caso da energia elétrica, a parcela de consumo fixo que antes era de 46% passou a ser de 39%. Já a parcela de consumo fixo do gás passou de 27% para 10%.

Considerando os valores de R\$ 52,90/GJ para energia elétrica e R\$ 34,68/GJ para gás natural, é possível também estimar os ganhos com as modificações propostas através das simulações (Tabela 24).

No caso do pré-aquecimento da água do circuito da UTE 1, a maior economia foi obtida caso fosse utilizada toda a vazão de gases de exaustão disponível nos fornos da Pintura. Considerando 263 dias produtivos por ano, o ganho chega a R\$ 753.507,93. Já a inserção da turbina a gás não se mostrou interessante individualmente. O consumo de gás do equipamento não compensou a economia fornecida.

Ambos os chillers de absorção se apresentaram como soluções interessantes. O primeiro, de simples efeito, combinado à produção de água quente, apresentou uma economia anual de R\$ 2,43 milhões. O chiller de duplo efeito junto a turbina a gás e a produção de água quente foi a solução que trouxe maior ganho: R\$ 3.997.767,13.

Tabela 24- Cálculo do ganho anual com as modificações sugeridas

Modificação	Consumo de gás natural (m³)	Ganho de gás natural (m³)	Ganho de gás natural (GJ)	Economia com gás (R\$)	Ganho carga térmica água gelada(kW)	Ganho energia elétrica para água gelada (GJ)	Ganho de potência elétrica (kW)	Ganho energia elétrica (MWh)	Ganho de eletricidade de total (GJ)	Economia com eletricidade (R\$)	Economia diária (R\$)	Economia anual (R\$)
<b>1</b> Correção excesso de ar		11,60	0,41	14,32							R\$ 14,32	R\$ 3.765,25
<b>2</b> Pré-aquecimento com gases da caldeira		114,75	4,08	141,62							R\$ 141,62	R\$ 37.245,86
<b>3</b> Pré-aquecimento com gases do Forno ED		1318,63	46,93	1627,43							R\$ 1.627,43	R\$ 428.014,23
<b>4</b> Pré-aquecimento com gases de todos os fornos		2321,41	82,61	2865,05							R\$ 2.865,05	R\$ 753.507,93
<b>5</b> Inserção de turbina a gás	10856,98		-386,38	-13399,52			1148,36	27,56	99,22	5248,65	-R\$ 8.150,87	-R\$ 2.143.679,48
<b>6</b> Inserção de turbina com pré-aquecimento	10856,98	2367,01	-302,14	-10478,19			1148,36	27,56	99,22	5248,65	-R\$ 5.229,54	-R\$ 1.375.369,56
<b>7</b> Chiller de absorção de simples efeito + pré-aquecimento		1201,84	42,77	1483,29	944,30	40,73			146,62	7756,38	R\$ 9.239,67	R\$ 2.430.033,94
<b>8</b> Turbina + chiller de absorção de duplo efeito + pré-aquecimento	10856,98	1075,42	-348,10	-12072,25	2691,20	116,07	1130,64	27,14	515,56	27272,89	R\$ 15.200,64	R\$ 3.997.767,13

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à sua importância, a eficiência energética tornou-se nas últimas décadas uma pauta internacional. Seu cunho econômico e ambiental faz com que os países criem políticas para diminuir o crescimento da demanda de energia em todos os setores da sociedade.

É importante que as informações a respeito deste tema sejam disseminadas em todos os segmentos, principalmente nas indústrias. Este grupo é o maior consumidor e ao mesmo tempo possui enorme potencial de atuação, desde a implementação de um programa de gestão de energia até a escolha de equipamentos mais modernos e eficientes.

O Brasil já possui diversos programas voltados para a eficiência energética. A maioria deles, porém, não tem como prioridade o setor industrial, sendo necessário um ajuste de foco. É preciso difundir as técnicas e fazer com que a própria empresa busque seus resultados.

O caso da indústria automotiva analisada assemelha-se ao de várias outras indústrias localizadas em território nacional. Ainda que moderna, possui um grande potencial de otimização em seus processos, podendo diminuir sua demanda de energia com projetos de baixo custo. Após a realização do diagnóstico energético, foi possível identificar os vetores energéticos existentes, as principais áreas de consumo, a forma como o consumo ocorre e quais projetos de melhoria poderiam ser executados.

O diagnóstico energético mostrou-se como um passo fundamental para a implementação de um sistema de gestão de energia, contribuindo para uma melhor identificação de perdas e priorização de ações para aumento da eficiência. Embora nem todas as atividades sugeridas tenham sido realizadas ainda, já foi possível visualizar ganhos com algumas ações, conforme descrito no capítulo 6.

Projetos mais complexos, envolvendo recuperação de energia e cogeração também podem ser executados no futuro. Algumas das modificações sugeridas no processo apresentaram economia significativa: o pré-aquecimento da água quente com os gases de exaustão dos fornos e a inserção de chillers de absorção, em especial o chiller de duplo efeito combinado à uma turbina a gás e à produção de água quente. Estes cálculos, porém, não consideram os investimentos que precisariam ser realizados para instalação dos equipamentos, sendo este cálculo uma sugestão de trabalho futuro. É importante salientar que as tarifas consideradas são dos três primeiros meses de 2017, logo, o ganho tende a aumentar com preços atualizados.

Também são sugestões de trabalhos futuros:

- Investigar outros fatores que influenciem no consumo de energia da fábrica, como taxa de utilização, manutenções, necessidade de refrigeração/aquecimento e tamanho do veículo produzido para realizar melhor comparação com outras plantas;
- Análise dos gases de combustão de todos os queimadores da Pintura, de forma que a razão ar combustível seja monitorada e se necessário corrigida, ocasionando economia de gás natural;
- Estudos de viabilidade técnica para adequação das demandas de água gelada e de ar comprimido da Pintura, assim como a redução da pressão de entrega deste último;
- Análise de consumo aprofundada de outras áreas produtivas da planta (Prensas, Funilaria e Montagem);
- Inclusão de outras fontes de geração como solar, eólica e biomassa e
- Validação das simulações mediante dados experimentais, caso as intervenções sugeridas venham a ser instaladas.

Este trabalho é parte do sistema de gestão energia que foi criado e agregado ao de gestão ambiental previamente existente na fábrica analisada. Além do diagnóstico energético, foram ainda elaborados procedimentos de gerenciamento de requisitos legais, definição de objetivos e metas, treinamentos, comunicação, controle de documentos, monitoramento e medição, calibração de instrumentos e auditoria interna. Em agosto de 2017, a fábrica recebeu o certificado da ISO 50001.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE GOIANA. **Por que investir em Goiana**. Disponível em < <http://adgoiana.pe.gov.br/por-que-investir-em-goiana/>>. Acesso em 30 mar. 2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Produção, vendas e exportação de autoveículos no Brasil**. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/docs/siteautoveiculos2017.xlsx>>. Acesso em 06 jan. 2018.
- BACKLUND S., THOLLANDER P., PALM J., OTTOSSON M. Extending the energy efficiency gap, **Energy Policy**, 51, p. 392-396, 2012.
- BARBELI, Marcelo Carlos. A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, *Empreendedorismo, Gestão e Negócios*, 4 (4), p. 238-246, 2015.
- BARJA, G.J.A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- BOTTCHER C., MULLER M. Insights on the impact of energy management systems on carbon and corporate performance. An empirical analysis with data from German automotive suppliers, **Journal of Cleaner Production**, 137, 1449-1457, 2016.
- BRUCKNER S., LIU S., MIRÓ L., RADSPIELER M., CABEZA L.F., EBERHARD L. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, **Applied Energy**, 151, p. 157-167, 2015.
- CARBON TRUST, **Heat recovery: A guide to key systems and applications**. Disponível em: < [https://www.carbontrust.com/media/31715/ctg057\\_heat\\_recovery.pdf](https://www.carbontrust.com/media/31715/ctg057_heat_recovery.pdf)> . Acesso em 16 fev. 2018.
- CARVALHO H.M.B, GOMES J.O. Method for Increasing Energy Efficiency in Flexible Manufacturing Systems: A Case Study, **Procedia CIRP**, 29, 40-44, 2015.
- CARVALHO, E.N.C. **Modelagem e simulação de unidades resfriadoras de líquidos por absorção H<sub>2</sub>O-LiBr de simples e duplo efeito, incluindo o efeito de aditivos e clima local**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- CASTRO, A.T. **Gestão energética nos setores transversais para redução do consumo de energia em uma empresa automobilística**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- CIBULKA, J. Kinetic energy recovery system by means of flywheel energy storage. **Advanced Engineering**, v. 3, n. 1, 2009.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Manual da eficiência energética na indústria**. Curitiba, 2005. 155 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional**. Brasília: CNI, 2009.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Indústria automobilística e sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012.

COPERGÁS. Produtos. Disponível em <<https://www.copergas.com.br/produtos/>>. Acesso em 30 mar. 2018.

DAMRATH F., STRAHILOV A., BAR T., VIELHABER M.. Method for Energy-efficient Assembly System Design within Physics-based Virtual Engineering in the Automotive Industry, **Procedia CIRP**, 41, 307-312, 2016.

DEHNING P., THIEDE S., MENNENGA M., HERRMANN C. Factors influencing the energy intensity of automotive manufacturing plants, **Journal of Cleaner Production**, 142 (4), 2305-2314, 2017.

DENG J., WANG R.Z., HAN G.Y. A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems, **Progress in Energy and Combustion Science**, 37 (2), p. 172-203, 2011.

DONGELLINI, M., MANINOSCI C., MORINI G.L. Energy audit of an industrial site: a case study. **Energy Procedia**, v. 45, p. 424 – 433, 2014.

**EBSILON STEAG Energy Services GmbH**: Version 12. Disponível em: [http://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon\\_professional.html](http://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon_professional.html). Acesso em 16 fev. 2018.

ELETROBRAS. **Metodologia de realização de diagnóstico energético**: Guia básico. Brasília: IEL/NC, 2009. 108 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota técnica DEA 14/10**: Eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro, 2010. 46 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota técnica DEA 13/15**: Demanda de energia 2050. Rio de Janeiro:, 2016. 257 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro, 2017. 296 p.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **International energy outlook 2017**. Disponível em: < <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>>. Acesso em 16 fev. 2018.

FARSHI L.G., MAHMOUDI S.M.S., ROSEN M.A. Anaysis of crystallization risk in double effect absorption refrigeration systems, **Applied Thermal Engineering**, 31, p. 1712-1717, 2011.

FARSHI L.G., MAHMOUDI S.M.S., ROSEN M.A., YARI M. A comparative study of the performance characteristics of double-effect absorption refrigeration systems, **Int. J. Energy Res.**, 36, p. 182-192, 2012.

FCA Latam. **Polo Automotivo Jeep - A Operação do Complexo**. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=2erzBN6adDs&list=PLF44bWRWnUkrLO1pZRyCoDI SDsikgIR7q&index=2>>. Acesso em 30 mar. 2018.

FENG L., MEARS L. **Analysis of HVAC energy in automotive paint shop**. ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2015.

FERNANDES, J. **Diagnóstico energético da indústria de placas de borracha e otimização do sector de pintura**. 2010. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010.

FRANZ E., ERLER F., LANGER T., SCHLEGEL A., STOLDT J., RICHTER M., PUTZ M. Requirements and Tasks for Active Energy Management Systems in Automotive Industry, **Procedia Manufacturing**, 8, 175-182, 2017.

FYSIKOPOULOS, A., ANAGNOSTAKIS D., SALONITIS K., CHRYSSOLOURIS G. An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly. **Procedia CIRP**, Elsevier, 3, p. 477 – 482, 2012.

GALITSKY, C.; WORRELL, E. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the vehicle assembly industry: an energy star guide for energy and plant managers**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

GANAPATHY, V. Understand steam generator performance. **Chemical Engineering Progress**, 1994.

GODOI, J.M.A. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3 ed. São Paulo: EDUSP, 2008. 396 p.

GOMES, A. E. V. **Recuperação da energia térmica de motores de combustão interna numa central termoelétrica**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2014.

GORDIC, D., BABIC M., JOVICIC N., SUSTERSIC V., KONCALOVIC D., JELIC D. Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2783 – 2790, 2010.

GOUVEIA, J. P. C. L. B. **Certificados brancos: Análise e contributos para a sua aplicação em Portugal**. 2008. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

GUERRERO, C.A., WANG J., LI J., XIAO G. Production system design to achieve energy savings in an automotive paint shop. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 22, p. 6769–6785, 2011.

HAZEN, Robert M.; TREFIL, James. **Science matters: Achieving scientific literacy**. 2 ed. United States of America: Anchor Books, 2009. 360 p.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; **Energia e meio ambiente**. 4 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 708 p.

HORUZ, I. A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in vapor absorption refrigeration systems, **Ins.Comm. Heat Mass Transfer**, 25 (5), p.711-721, 1998.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Management Programmes for Industry**. 2012. 82 p. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/policypathwaysindustry.pdf>>. Acesso em 16 fev. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency**. Paris, 2014. 232p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy efficiency market report 2015: Market Trends and Medium-Term Prospects**. Paris, 2015. 250 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key world energy statistics**. 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em 16 jan. 2018

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Efficiency**. 2017b. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy\\_Efficiency\\_2017.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Efficiency_2017.pdf)>. Acesso em 16 jan. 2018

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World energy balances: overview**. 2017c. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>>. Acesso em 16 jan. 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 50001: Energy Management Systems**.2011.

IPCC. **Summary for Policymakers**. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

KABIR, G.; ABUBAKAR, A.I.; EL-NAFATY, U.A.; Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant. **Energy**, v. 35, n. 3, p. 1237-1243, 2010.

LOVINS, A. B. The Negawatt Revolution. **The Conference Board Magazine**, v. 27, n. 9, 1990.

MARTINEZ F.R., MARTINEZ R.A.A., VELAZQUEZ M.T., DIEZ P.Q., ESLAVA G.T., FRANCIS J.A. Evaluation of the Gas Turbine Inlet Temperature with Relation to the Excess Air, **Energy and Power Engineering**, 3, 517-524, 2011.

MATHIAS, F.R.C. **Diagnóstico Energético e Gestão da Energia em uma Planta Petroquímica de Primeira Geração**. 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+En+erg%C3%A9tica+%28PDF%29/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1>>. Acesso em 16 fev. 2018.

MORAN, M. J. SHAPIRO H.N., BOETTNER D.D., BAILEY M.B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 819 p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2017. **Global Climate Change: Vital Signs of the Planet**. Disponível em <<https://climate.nasa.gov/effects/>>. Acesso em 12 nov.2017.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Gas-fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations**, Golden, 2003.

NILAKANTAN J.M., HUANG G.Q., PONNAMBALAM S.G. An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems, **Journal of Cleaner Production**, 90, 311-325, 2015.

NOGUEIRA, L. A. H. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 91-105, 2007.

OFFICE OF ENVIRONMENT AND HERITAGE (OEH). **Cogeneration Feasibility Guide**, Sydney, 2014.

OLIVEIRA, I.P. **Eficiência energética em sistemas de energia elétrica: um estudo de caso em uma indústria de lubrificantes**. 2015. 108 f. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade), Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2015.

ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES (OICA). **Imagem Global e Reputação da Indústria Automobilística**. 2015. 21p. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/OICA.pdf>>. Acesso em 16 fev. 2018.

ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES (OICA). **2016 Statistics**. 2017. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/2016-statistics/>>. Acesso em 16 fev. 2018.

PATTERSON, Murray G. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

SALAZAR, S. **Avaliação dos programas de conservação de energia para o setor industrial**. 1992. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

SALUM A.D. **Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira**. 2011. 54f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Industrial), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SANTOS, M. B. G. D., GOMES L.G., BARBOSA E.A., CARVALHO F.O. **Diagnósticos Energéticos em Indústrias - Estudo de Caso**. XXV Encontro Nac. de Eng. de Produção, Porto Alegre, out. 2005.

SARTI F., BORGHI R.A.Z. Evolução e desafios da indústria automotiva no Brasil. 2015. Disponível em: < <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/brasilien/12039.pdf>>. Acesso em 16 fev. 2018.

SCHLEI-PETERS I., KURLE D., WICHMANN M.G., THIEDE S., HERMANN C., SPENGLER T.S. Assessing Combined Water-Energy-Efficiency Measures in the Automotive Industry, **Procedia CIRP**, 29, 50-55, 2015.

SCHULZE M., NEHLER H., OTTOSSON M., THOLLANDER P. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework, **Journal of Cleaner Production**, 112 (5), 3692-3708, 2016.

SILVA, D.A. **Avaliação de eficiência energética em uma indústria de painéis compensado**. 2001. 219 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

TANAKA, K. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. **Energy Policy**, v.39, p. 6532-6550, 2011.

UNITED NATIONS (UN), 2017. **UN Climate Change Conference**. Disponível em <<http://www.cop-23.org/>>. Acesso em 30 mar. 2018.

WANG J., LI J., HUANG N. **Optimal Scheduling to Achieve Energy Reduction in Automotive Paint Shops**, ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 1, 161-167, 2009.

WANG S.K. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. 2 ed. McGraw-Hill, 2000.

WIEMES, L.; PAWLOWSKY, U. **Otimização do consumo de energia elétrica e gás natural em indústria automobilística**. 4th International workshop of advances in cleaner production, São Paulo, maio.2013.

WORRELL, E.; ANGELINI T.; MASANET E. **Managing your energy: an energy star guide for identifying energy savings in manufacturing plants**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.

ZAHLER, C.; IGLAUER, O. Solar Process Heat for Sustainable Automobile Manufacturing. **Energy Procedia**, v. 30, p. 775 – 782, 2012.

ZUCCHI, Enrico. **Aproveitamento da energia térmica dos gases do sistema de exaustão**. 2012. 34 f. Trabalho de conclusão (Pós-graduação em Engenharia Automotiva). Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.