



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS
FUNDAMENTAIS



DAMIANA TOMERIA ANDRADE

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
COGERAÇÃO APLICADO À INDÚSTRIA DE RODAS DE LIGA LEVE

OURO PRETO - MG
2017

DAMIANA TOMERIA ANDRADE

dami_andrade@hotmail.com

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
COGERAÇÃO APLICADO À INDÚSTRIA DE RODAS DE LIGA
LEVE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Professora orientadora: Elisângela Martins Leal, Ph.D.

**OURO PRETO – MG
2017**

A553a Andrade, Damiana Tomeria.
Análise energética de um sistema de cogeração aplicada à indústria de rodas de liga leve [manuscrito] / Damiana Tomeria Andrade. - 2017.

83f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Energia - Fontes alternativas - Cogeração. 2. Energia - Oferta e procura. 3. Automóveis - Rodas. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 30º dia do mês de março do ano de dois mil e dezessete às 15 horas, na sala 04, localizada na Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia da aluna **Damiana Tomeria Andrade**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Prof. MSc. Sávio Sade Tayer e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. A candidata apresentou o trabalho intitulado: **“Análise Energética de um Sistema de Cogeração Aplicado à Indústria de Rodas de Liga Leve”**, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram a aluna aprovada com a nota/conceito 9,4.

Ouro Preto, 30 de março de 2017.

Elisângela Martins Leal

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Luis Antonio Bortolaia

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Savio Sade Tayer

Prof. MSc. Sávio Sade Tayer
Professor Avaliador

Damiana Tomeria Andrade

Damiana Tomeria Andrade
Aluna

AGRADECIMENTO

À Deus.

Aos meus pais, pela força, incentivo e amor que nunca deixaram faltar em minha vida. E não menos aos meus irmãos.

À minha orientadora Elisângela Martins Leal, que extrapolando a função de mestre, soube identificar a forma e o momento dos incentivos e me permitiu compartilhar de sua amizade.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Aos verdadeiros amigos do curso de engenharia mecânica, em especial Fernanda Sant'Ana Seabra por todos os conselhos e a amizade pra vida inteirada. Aos amigos da equipe Gigantes HND e da cidade de Ouro Preto que me deram alegrias, forças e suporte para alcançar mais este grande objetivo de vida. À República Sedução pelo acolhimento ímpar, amizade, ensinamentos e rocks.

A todas as pessoas especiais que me apoiaram e apoiam em todos os meus sonhos e auxiliam na concretização destes.

The Road Not Taken

Two roads diverged in a yellow wood,

And sorry I could not travel both

And be one traveler, long I stood

And looked down one as far as I could

To where it bent in the undergrowth;

Then took the other, as just as fair,

And having perhaps the better claim,

Because it was grassy and wanted wear;

Though as for that the passing there

Had worn them really about the same,

And both that morning equally lay

In leaves no step had trodden black.

Oh, I kept the first for another day!

Yet knowing how way leads on to way,

I doubted if I should ever come back.

I shall be telling this with a sigh

Somewhere ages and ages hence:

Two roads diverged in a wood, and I—

I took the one less traveled by,

And that has made all the difference.

Robert Frost, 1916

RESUMO

A matriz energética brasileira atual está configurada nos sistemas de geração hidrelétrica com apoio de sistemas de geração termelétrica. Vivemos uma situação na qual a matriz hidrelétrica está chegando a um limite de resposta ao aumento de demanda por eletricidade, fazendo com que o parque gerador termelétrico seja utilizado com maior frequência. Isso encarece a eletricidade ao consumidor final. A indústria de rodas de liga leve apresenta elevado consumo energético e, atualmente, com os problemas que atingem o setor elétrico brasileiro como as ameaças de *déficit*, riscos de interrupção do fornecimento e consecutivas elevações de tarifas, tem incentivado o investimento em autogeração, alternativas de reaproveitamento e racionalização de energia. O presente trabalho consiste em uma pesquisa exploratória, quantitativa, de caráter bibliográfico e de estudo de caso. A metodologia empregada está de acordo com as caracterizações energéticas da empresa, na qual se utilizou das formulações aplicáveis a partir dos princípios da termodinâmica, principalmente Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, e dos ciclos Diesel e Rankine. O sistema de cogeração proposto e analisado foi o de um motor de combustão interna associado a um trocador de calor operando em paridade elétrica e que obteve eficiência máxima de 73%. Para efeito de comparação, outro sistema empregando uma turbina a gás também foi analisado, cuja eficiência de cogeração atingiu 48%. A central de cogeração proposta, utilizando o motor de combustão interna, obteve o valor de eficiência aceitável e atendeu as necessidades energéticas da indústria. Já a proposta de cogeração utilizando a turbina a gás não obteve valor de eficiência de cogeração aceitável, contudo atendeu as necessidades energéticas da indústria.

Palavras-chave: cogeração, demanda energética, indústria de rodas de liga leve, ciclo Diesel, ciclo Rankine, análise de primeira lei, análise de segunda lei.

ABSTRACT

The current Brazilian energy matrix is configured in hydroelectric generation systems with the support of thermoelectric generation systems. We live in a situation in which the hydroelectric matrix is reaching a limit of response to the increase in demand for electricity, making the thermoelectric generating plant more frequent. This increases electricity to the final consumer. The light alloy wheels industry has a high energy consumption and, currently, with the problems that affect the Brazilian electric sector, such as the threats of deficit, supply interruption risks and consecutive tariff increases, have encouraged the investment in self-generation, alternatives of Reuse and rationalization of energy. The present work consists of an exploratory, quantitative, bibliographical and case study research. The methodology used is in accordance with the energy characterization of the company, using the applicable formulations from the principles of thermodynamics, mainly First and Second Law of Thermodynamics, and the Diesel and Rankine cycles. The proposed and analyzed cogeneration system was an internal combustion engine associated with a heat exchanger operating in electric parity and achieving a maximum efficiency of 73%. For comparison purposes, another system employing a gas turbine was also analyzed, whose cogeneration efficiency reached 48%. The proposed cogeneration plant, using the internal combustion engine, obtained the acceptable efficiency value and met the energy needs of the industry. However, the proposal for cogeneration using the gas turbine did not obtain an acceptable cogeneration efficiency value, yet it met the energy needs of the industry.

Keywords: *cogeneration, energy demand, Alloy wheels industry, Diesel cycle, Rankine cycle, first law analysis, second law analysis.*

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APE – Autoprodutores

BEN – Balanço Energético Nacional

CHP – *Combined Heat and Power* (Combinação de Calor e Energia)

CNI – Confederação Nacional da Indústria

COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

Fenabreve – Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores

ICE – Ignição por centelha

ICO – Ignição por compressão

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

MCI – Motor de Combustão Interna

PCI – Poder Calorífico Inferior

PME – Pressão Média Efetiva

PMI – Ponto Morto Inferior

PMS – Ponto Morto Superior

PPT – Plano Prioritário de Termelétricidade

SIN – Sistema Interligado Nacional

SRC – Sistema de Refrigeração por Compressão

TEC – Turbina de Extração-Condensação

LISTA DE SIMBOLOS

ALFA	- Razão entre a potência elétrica e a potência térmica consumida no segmento [kWe/kWth]
C	- Cilindrada [m ³]
Cp	- Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]
Cv	- Calor específico a volume constante [kJ/kg.K]
COPRef	- Coeficiente de performance do refrigerador [-]
E	- Potência eletromecânica consumida no segmento [kWe]
E'	- Potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração [kWe]
hi	- Entalpia no ponto "i" [kJ/kg]
m	- Massa [kg]
ṁ	- Vazão mássica [kg/s]
Pi	- Pressão no ponto "i" [bar ou kPa]
PCI	- Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PME	- Pressão média efetiva [MPa]
Qe	- Calor fornecido [kW]
QF	- Calor absorvido pelo espaço refrigerado [kW]
QH	- Calor fornecido [kW]
QL	- Calor rejeitado [kW]
Qs	- Calor fornecido [kW]
rc	- Razão de corte [-]
S	- Potência térmica consumida no segmento [kWth]
S'	- Potência térmica gerada pelo sistema de cogeração [kWth]
Ti	- Temperatura no ponto "i" [°C ou K]
TC	- Taxa de compressão [-]
vi	- Volume específico no ponto "i" [m ³ /kg]
VPMI	- Volume no ponto morto inferior [m ³]
VPMS	- Volume no ponto morto superior [m ³]
W	- Potência [kW]
Wciclo	- Trabalho do ciclo [kJ/kg]
We	- Potência fornecida ao compressor [kW]

SÍMBOLOS GREGOS

$\eta_{g,cog}$	- Eficiência global da cogeração [%]
$\eta_{t,Diesel}$	- Eficiência térmica do ciclo Diesel [%]
$\eta_{t,Rankine}$	- Eficiência térmica do ciclo Rankine [%]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema básico de atendimento às demandas em centrais de cogeração.....	2
Figura 2: Indicador de Custos Industriais.....	8
Figura 3: Custo com energia - série histórica.....	9
Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte.	10
Figura 5: Exemplo de ganho de eficiência com uma Central de Cogeração.....	12
Figura 6: Sistema de cogeração em configuração <i>topping</i> e <i>bottoming</i>	14
Figura 7: Ciclo Rankine Simples Ideal.....	18
Figura 8: Os ciclos aberto e fechado de uma turbina a gás.	21
Figura 9: Diagrama $T-s$ e $P-v$ ciclo Brayton ideal.....	21
Figura 10: Conjunto pistão - cilindro de um motor de combustão interna.....	24
Figura 11: Diagramas $P-v$ e $T-s$ do ciclo diesel ideal.....	25
Figura 12: Desenho esquemático do conjunto de moldes e roda injetada mostrando a região de injeção.....	30
Figura 13: Etapas de forjamento de rodas de alumínio.	33
Figura 14: Fluxograma das etapas da monografia.....	40
Figura 15: Consumo de gás natural por mês.	43
Figura 16: Demanda de energia elétrica registrada e contratada pela empresa entre os anos de 2012 e 2013.....	44
Figura 17: Sistema de cogeração proposto com motor de combustão interna.	48
Figura 18: Modelos de Motogeradores selecionados.	50
Figura 19: Sistema de cogeração proposto com turbina a gás.....	53
Figura 20: Turbinas a gás selecionadas.	54
Figura 21: Análise Heat Rate e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Capstone para 86°F (30°C).	55
Figura 22: Análise Heat Rate e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Caterpillar.....	55

Figura 23: Análise <i>Heat Rate</i> e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Kawasaki.	56
Figura 24: Atendimento a Demanda elétrica de cada equipamento.	59
Figura 25: Atendimento a Demanda térmica de cada equipamento.	59
Figura 26: Potências térmica, elétrica e de cogeração de cada equipamento.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das características das tecnologias de cogeração.....	17
Tabela 2: Razão Calor/potência elétrica e outros parâmetros do sistema de cogeração	34
Tabela 3: Variáveis e indicadores de pesquisa.	41
Tabela 4: Média de vendas por semestre.....	45
Tabela 5: Número de emplacamentos.	45
Tabela 6: Base de cálculo do PCI do gás natural.	46
Tabela 7: Parâmetros de caracterização das necessidades da indústria.....	47
Tabela 8: Especificações dos motogeradores selecionados.....	50
Tabela 9: Parâmetros de saída dos cenários do sistema proposto.	52
Tabela 10: Especificações das turbinas selecionadas.....	57
Tabela 11: Parâmetros para análise da Potência de Cogeração.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	5
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	6
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	O setor energético brasileiro.....	7
2.2	A cogeração	10
2.3	Caracterização dos ciclos e tipos	13
2.3.1	O ciclo Rankine	18
2.3.2	O ciclo Brayton.....	20
2.3.3	O ciclo Combinado.....	22
2.3.4	Ciclos Motores.....	23
2.4	Indústria de Rodas de Liga Leve	27
2.4.1	Fabricação.....	27
2.5	Seleção e configuração da central	33
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Tipo de Pesquisa.....	37
3.2	Materiais e Métodos	39
3.3	Variáveis e Indicadores	40
3.4	Instrumento de coleta de dados	42
3.5	Tabulação dos dados.....	42
3.6	Considerações Finais	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Caracterizações da empresa.....	43
4.2	Sistemas de cogeração propostos	47
4.2.1	Sistema de cogeração com motor de combustão interna.....	47
4.2.2	Sistema de cogeração com turbina a gás	53

4.3	Resumo da análise energética do sistema de cogeração comparativo.....	58
4.4	Considerações finais	60
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62
5.1	Conclusões.....	62
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste primeiro capítulo uma breve abordagem teórica e global sobre a cogeração, assim como a relevância do seu emprego no setor industrial, além de toda uma contextualização do problema abordado neste trabalho através dos conceitos e análises da aplicabilidade dos ciclos e dos elementos que constituem os sistemas de cogeração. Portanto, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na formulação do problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

Desde a descoberta da eletricidade, esta passou a exercer papel de extrema importância na humanidade, principalmente nos setores industriais. Contudo, o custo da energia elétrica é responsável por grande fatia do orçamento de qualquer empresa. Sendo de grande importância utilizar de novos métodos para redução do consumo de energia, racionamento e principalmente, atuar efetivamente nas análises de falhas vinculadas a falta de fornecimento, pois, mesmo que momentânea, podem acarretar prejuízo em grande escala, dependendo do ramo produtivo envolvido.

De acordo com Balestieri (2002), como alternativa para garantir a continuidade do sistema produtivo de certos setores, a autoprodução de energia, nas formas de energia eletromecânica e calor industrial para processos, pode ser uma necessidade imperiosa, uma vez que algumas áreas podem ser consideradas prioritárias no atendimento da demanda em função dos níveis de confiabilidade exigidos para sua operação. Nesses casos, o desejável retorno dos investimentos em equipamentos de geração pode ser estimado pela prática da cogeração.

Segundo Silveira (1994), a cogeração é um método efetivo de conservação de energia primária, que pode ser aplicado quando economicamente justificado. O termo cogeração é usualmente empregado para designar a geração simultânea de calor e potência (mecânica ou elétrica) em instalações do setor industrial e terciário.

De acordo com Bastos (2011), as crises energéticas e as guerras foram fatores cruciais para impulsionar novos estudos que culminaram no desenvolvimento e na aplicação de sistemas de cogeração. A técnica da cogeração não é de aplicação recente. Dados históricos apontam que o início do desenvolvimento desta prática ocorreu em meados de 1870. Contudo, diante dos eventos históricos que proporcionaram grandes mudanças socioeconômicas de impacto global como as crises do petróleo e as guerras mundiais, a cogeração passou por momentos de auge e também de esquecimento.

Balestieri (2002) afirma que, em termos de classificação geral, a cogeração consiste na produção simultânea de duas formas diferentes de energia útil, como por exemplo, energia elétrica e térmica, a partir de uma única fonte de energia e que tem por objetivo suprir as demandas de uma unidade de processo. Esse sistema torna-se atraente devido à capacidade de aproveitamento da energia contida na fonte, proporcionando o aumento da eficiência do sistema termodinâmico como um todo.

A Figura 1 apresenta esquematicamente um processo básico de atendimento às demandas de cogeração.

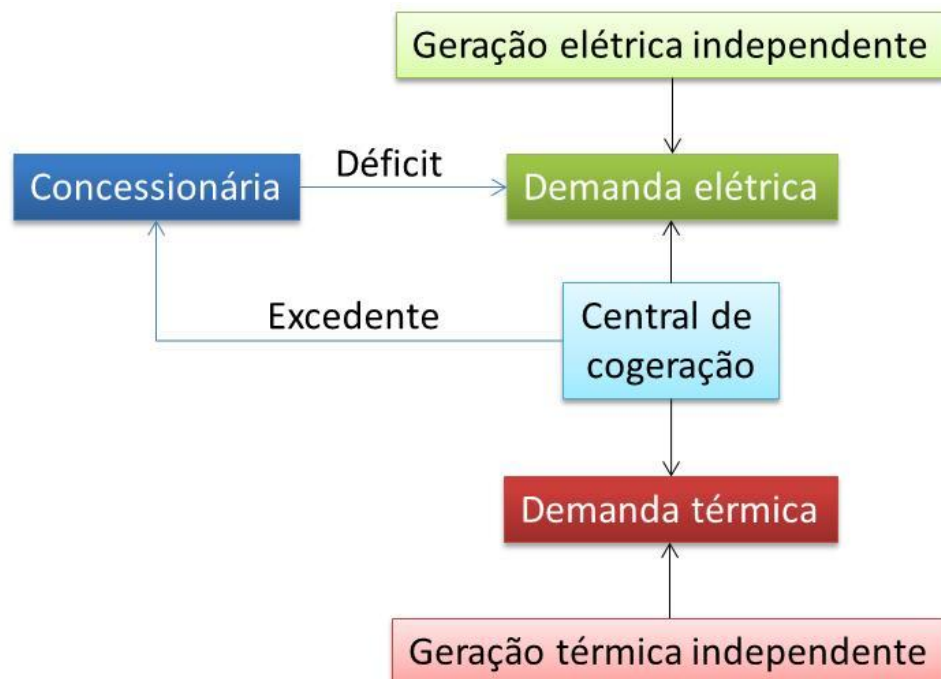


Figura 1: Esquema básico de atendimento às demandas em centrais de cogeração.

Fonte: Adaptado de Balestieri, 1994.

De acordo com Castro (2009), os sistemas de cogeração classificam-se de acordo com o tipo de máquina térmica que os equipam. Como máquinas térmicas são usadas, tradicionalmente, motores alternativos (ciclo Otto e ciclo Diesel) ou turbinas a gás ou a vapor e, mais recentemente, microturbinas e células combustíveis.

Os processos de cogeração podem ser aplicados nas suas diferentes formas em inúmeros diferentes setores de atividade. Algumas das principais aplicações são (COGEN, 2015):

- Setor industrial – calor de processo – produção de vapor: indústria química, petroquímica e farmacêutica; indústria de alimentos e bebidas; indústria de papel e celulose; indústria têxtil.
- Setor industrial – aquecimento direto – forno alta temperatura, indústria de vidro; indústria de cimento; siderúrgica.
- Setor comercial e serviços – ar-condicionado central, aquecimento de água, shopping Center; centros comerciais; supermercado; hotel; hospital; lavanderia e tinturaria; clubes desportivos.
- Setor sucroenergético – bioeletricidade: usinas de açúcar e etanol que geram energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar e também da sua palha e pontas.

Entre os setores potencialmente viáveis à implantação de sistemas de cogeração, estão o setor industrial e o setor terciário (SILVEIRA, 1994).

Segundo Soares (2015), o setor industrial responde por 35,1% de toda a energia consumida no Brasil. Na indústria, o consumo de energia elétrica representa um dos custos mais elevados para o processo de produção e, diante deste cenário, a economia de energia obtida em ações de eficiência energética no setor industrial gera benefícios para toda a sociedade.

Uma indústria de rodas de liga leve apresenta um sistema complexo de geração, transformação e distribuição das diferentes formas de energia. Essa condição vincula-se ao fato de que o processo produtivo envolve aquecimentos subsequentes em diversas etapas, demandando parcelas expressivas de energia térmica e elétrica. Esse consumo de energia associa-se diretamente à garantia da qualidade dos produtos, que na maioria dos casos são submetidos a tratamento térmico durante todo o processo de fabricação.

Mas os novos paradigmas ambientais das linhas de produção automotiva têm reinventado a roda. Com a popularização dos automóveis e a alta dos combustíveis, surgiu a necessidade de veículos mais leves que consumissem menos, conseqüentemente, automóveis mais econômicos e com menores índices de emissão de poluentes (ABAL, 2015).

Nesta época, as rodas eram feitas de aço e várias pesquisas foram desenvolvidas para diminuir o seu peso. Nas montadoras norte-americanas já se investe na conformação por forjamento do alumínio para diminuir o peso das rodas, o que torna mais econômico (ABAL, 2015).

De acordo com a revista FORGE (2015), o desperdício de energia térmica no processo de forjamento a quente ocupa uma posição importante entre os principais processos de fabricação de peças metálicas. Durante milênios e até numa época recente, o forjamento de metais e suas ligas era a base sólida para o progresso tecnológico da humanidade.

Uma das forjarias mais modernas, a empresa Dana (Gravataí-RS), joga no ar anualmente uma quantidade de energia térmica na forma de calor residual que custa cerca de USD\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de dólares). Na prática, o calor residual reaproveitado é usado geralmente em aquecedores de água, mas na maioria dos casos, esse calor não possui utilidade econômica e é lançado no meio ambiente, causando impacto ambiental negativo.

De acordo com a COPEL (2014), com o uso eficiente da energia elétrica, a indústria terá uma melhor utilização das instalações e equipamentos elétricos, uma redução no consumo de energia e conseqüente economia nas despesas com eletricidade. Com o melhor aproveitamento da energia, conseguirá um aumento de produtividade e um padrão de qualidade no produto acabado, isto tudo, mantendo o nível de segurança e diminuindo o tempo de parada das máquinas para a realização de manutenção.

Assim, perante esse contexto, tem-se a seguinte problemática:

Diante dos benefícios da cogeração, qual a configuração e os parâmetros desse sistema que melhor se enquadra à indústria de rodas de liga leve em estudo?

1.2 Justificativa

O trabalho foi baseado na crescente necessidade da indústria de estar sempre à frente em tecnologia e desempenho nos seus processos, para que possa produzir da forma mais segura, limpa e eficiente possível. A escolha dos sistemas de cogeração deste projeto decorreu da importância na redução dos custos energéticos que a indústria possui.

Segundo ANEEL (2015), empresas que investem em projetos de eficiência energética podem economizar recursos, ganhar competitividade e amenizar a pressão sobre o aumento da oferta de energia. Para se garantir no atual mercado global, é preciso apostar em inovação e perseguir a eficiência em todos os setores, incluindo o consumo de energia. Mesmo com alterações tarifárias e variações nos modelos energéticos, projetos de cogeração de energia e eficiência energética continuam a ser imprescindíveis para as empresas. Potenciais de eficiência energética estão presentes na maior parte das empresas.

Uma boa saída para indústrias e comércio nacional manterem a competitividade em relação ao mercado internacional e a outras empresas do mesmo setor está nos programas de eficiência energética disponibilizados pelas empresas de serviços de conservação de energia e concessionárias.

Tendo em vista as grandes vantagens da aplicação de sistemas de cogeração no setor industrial, se viu a necessidade de aperfeiçoar o processo de fabricação de rodas de liga leve numa indústria e conseqüentemente obter os ganhos tanto econômicos quanto socioambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Estudar o sistema de cogeração aplicado a uma indústria de rodas de liga leve. Este estudo envolve a busca da configuração, dos parâmetros de processo que melhor se adequam às necessidades da empresa e a análise técnica do sistema de cogeração proposto.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os sistemas de cogeração e seus ciclos;
- Identificar os parâmetros de caracterização de um processo específico da indústria de rodas de liga leve em estudo: razão entre calor e potência elétrica, consumo específico de vapor, combustível e calor, eficiência termodinâmica, disponibilidade e confiabilidade de cada equipamento;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Analisar, detalhar e fundamentar o sistema de cogeração proposto;
- Realizar sugestões para estudos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em cinco capítulos e apresenta-se conforme a estrutura a seguir:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específico.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do processo produtivo de uma indústria de rodas de liga leve e dos sistemas de cogeração, apresentando seus ciclos e introduzindo os conceitos da análise energética (térmica e elétrica).

O processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes imprescindíveis na obtenção dos resultados, é apresentado no terceiro capítulo.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados. O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações relacionadas ao assunto tratado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se o embasamento teórico a partir de uma literatura adequada referente ao setor energético brasileiro e na exposição dos conceitos, ciclos e configurações da cogeração, dando ênfase a análises técnicas dos sistemas envolvendo motores de combustão interna, assim como toda uma conceituação e contextualização destes componentes.

2.1 O setor energético brasileiro

Thurston (1878) cita que a preocupação com a racionalidade energética em sistemas de produção de energia está presente há séculos, desde James Watt, que após receber uma máquina a vapor de Newcomen para ser consertada, em 1763, proporcionou grandes avanços na concepção de sistemas mais eficientes. Foi quando nasceu o anseio em se melhorar o rendimento de tais máquinas, onde Watt realizou diversos experimentos para quantificar o aproveitamento útil da energia fornecida pela queima do carvão.

Balestieri (1994) comenta a crescente pressão que a indústria brasileira vem sofrendo no sentido de cortar custos e demonstrar maior responsabilidade com a qualidade dos serviços energéticos. Uma série de estudos aponta para a evolução da participação da energia nos custos totais de produção das plantas industriais. Como alternativa para garantir a continuidade do sistema produtivo de certos setores, a autoprodução de energia, nas formas de energia eletromecânica e calor industrial para processos, pode ser uma necessidade imperiosa.

Segundo a CNI (2015), entre os componentes do custo de produção, o custo com energia e o custo com bens intermediários importados registraram as maiores taxas de crescimento: 12,4% e 9,1%, respectivamente, como se pode verificar na Figura 2.

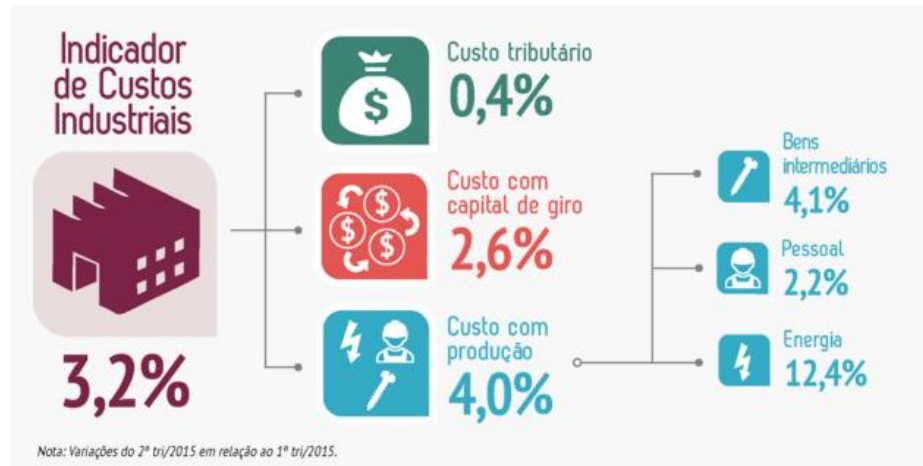


Figura 2: Indicador de Custos Industriais

Fonte: CNI, 2015.

De acordo com a Figura 2, o custo com energia continuou a apresentar forte expansão, com crescimento de 12,4% entre o primeiro e o segundo trimestres de 2015 na série livre de efeitos sazonais. Esse aumento foi fruto do aumento de 16,4% no custo com energia elétrica e da redução de 1,6% no custo com óleo combustível. A baixa participação da energia no custo total médio da indústria de transformação, no entanto, faz com que a energia seja responsável por apenas 0,4 ponto percentual dos 3,2% de aumento no custo total.

O custo com energia se elevou em 49,4% entre o segundo trimestre de 2014 e o segundo trimestre de 2015, como pode ser verificado na Figura 3. Esse aumento foi resultado da expansão de 58,5% no custo com energia elétrica e de 2,6% no custo com óleo combustível (CNI, 2015).



Figura 3: Custo com energia - série histórica.

Fonte: CNI, 2015.

De acordo com o EPE (2015), a geração elétrica a partir de fontes não renováveis representou 26,9% do total nacional, contra 23,3% em 2013. A geração de autoprodutores (APE) em 2014 participou com 15,9% do total produzido, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas, atingindo um montante de 94,0 TWh. Desse total, 52,2 TWh são produzidos e consumidos in loco, ou seja, pela própria instalação geradora usualmente denominada como APE não injetada na rede elétrica. A autoprodução não injetada agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, a exemplo dos setores de Papel e Celulose, Siderurgia, Açúcar e Álcool, Química, entre outros, além do Setor Energético. Neste último, destacam-se os segmentos de exploração, refino e produção de petróleo.

Ainda de acordo com o EPE (2015), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 65,2% da oferta interna. Como se pode verificar na Figura 4, as fontes renováveis representam 74,6% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável.

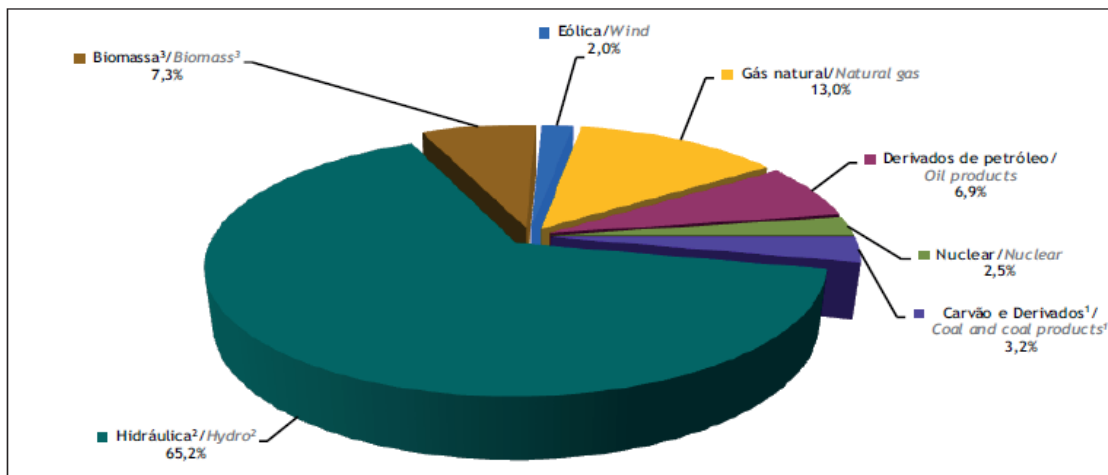


Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte.
Fonte: EPE, 2015.

Em 2001, em função da falta de investimento nas décadas anteriores em geração e transmissão, houve restrição de consumo de energia elétrica. O governo federal elaborou um Plano Prioritário de Termelétricidade (PPT) com a implantação de termelétricas a gás natural, com o gás natural proveniente da Bolívia. Entretanto, ocorreu uma rápida mudança nesta área, pois já em 2008 havia uma limitação de fornecimento deste combustível devido à alta demanda e às limitações de produção e transporte; e em 2009 devido à crise internacional, verificou-se uma grande redução do consumo com excedentes de gás natural, fazendo com que a Petrobrás realizasse leilões para sua venda (RODRIGUES, 2009).

2.2 A cogeração

De acordo com a Resolução N° 21 da ANEEL (2015) a cogeração é definida como “processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária”.

Em instalações industriais deve-se prever a interligação com a concessionária de energia elétrica para manter o suprimento em caso de paralisação do sistema de cogeração. Por outro lado, é interessante para a indústria ter a possibilidade de “comercializar” a eletricidade excedente (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Balestieri (2002) destaca as vantagens de utilização da cogeração:

- Elevação da eficiência conjunta de conversão da energia química do combustível em energia útil para patamares de até 85% (35% para energia elétrica e 50% para energia térmica, havendo variação de acordo com o ciclo térmico adotado);
- Possibilidade de uso de combustíveis renováveis ou resíduos em substituição aos combustíveis fósseis, apresentando menores índices de emissão de poluentes;
- Maior confiabilidade na utilização dos insumos energéticos para a empresa autoprodutora, sendo que a mesma somente produz energia para o seu uso exclusivo (BRASIL, 1996); especialmente em setores cujos processos não permitem falhas no fornecimento de energia;
- Facilidade de apropriação da tecnologia pelo quadro técnico das empresas;
- Possibilidade de geração de recursos para a empresa, mediante a interconexão da central de cogeração ao sistema elétrico da concessionária local, desde que as tarifas de compra e venda de energia elétrica se encontrem em patamares que remunerem o capital investido.

Entretanto, desvantagens também fazem parte deste ciclo. O reaproveitamento da energia térmica deve ser empregado próximo ao local de sua geração, necessita-se de um estudo detalhado de viabilidade econômica para implantação, pois dependendo do equipamento a ser utilizado e do layout do processo a ser modificado, tem-se um elevado custo de investimento inicial, os lucros provindos do sistema oscilam diretamente de acordo com o preço e a disponibilidade do combustível empregado e da energia elétrica oferecida (BALESTIERI, 2002).

Um exemplo de melhor eficiência na utilização do combustível pode ser verificado na Figura 5. Para se obter a mesma geração de energia elétrica e calor (5 MW de eletricidade e 8 MW de calor), com uma central de cogeração o consumo de combustível é 20,9% menor. Ou seja, as perdas reduziram de 40% para 23,5% e a eficiência aumentou de 60% para 76,5%.

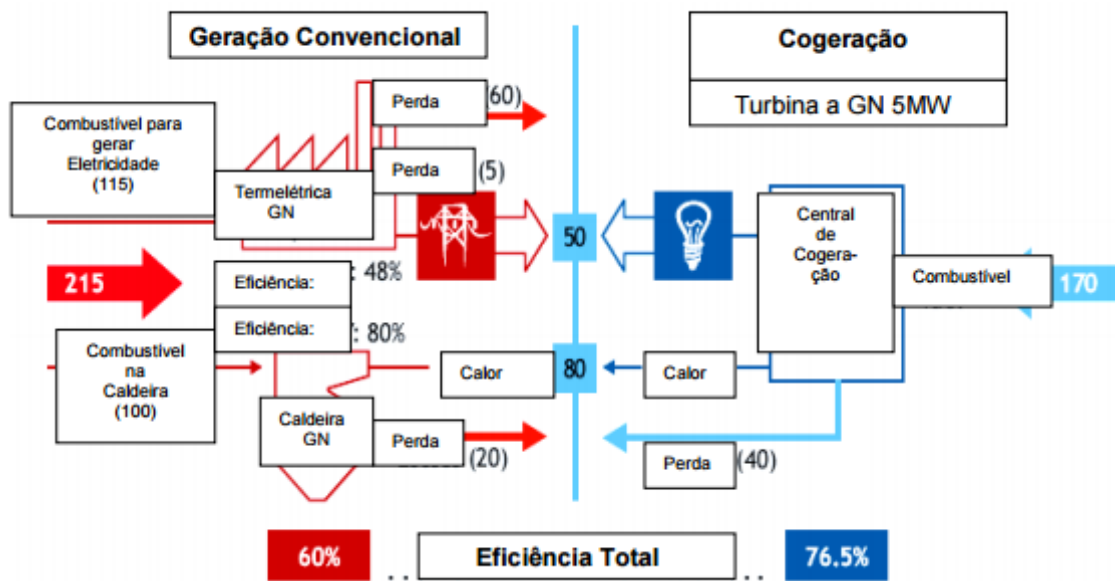


Figura 5: Exemplo de ganho de eficiência com uma Central de Cogeração
Fonte: Adaptado de IEA, 2016.

Arteaga (2010) afirma que a maior eficiência dos sistemas utilizando a cogeração em relação aos sistemas usuais está ligada ao fato da cogeração gerar energia elétrica a nível local e recuperar a energia térmica rejeitada dos dispositivos geradores, como por exemplo, turbinas a vapor, turbinas a gás e motores alternativos. Essa energia térmica reavida pode ser empregada em outros sistemas. Desta forma há um reaproveitamento energético e maior aplicabilidade global do combustível utilizado. Essa eficiência pode obter valores superiores a 80% em comparação com a média de 30-35% em termelétricas convencionais de combustíveis fósseis.

Segundo Walter (1994) a produção combinada de potência e calor pode existir dentro de três percepções distintas:

1. “Sistemas de calor distrital” ou “redes de calor”: associada a centrais termoelétricas onde o vapor de escape do processo de produção de potência é recuperado e utilizado no aquecimento ambiental. (RICKERSON et al., 2009; TORÍO & SCHMIDT, 2010; KELLY & POLLITT, 2010; SZKLO, 2001 apud KARAMANOS, 1997).

2. Este é o caso típico da indústria do açúcar e do álcool e das fábricas de celulose, no qual a possibilidade de viabilização da cogeração está associada a instalações industriais, a produção de potência elétrica pode estar destinada para o consumo da planta, satisfazendo parcial ou totalmente a demanda da mesma, e ainda vendendo parte da produção como excedente, depois de satisfeito o consumo interno (WALTER, 1994).

3. A terceira forma em que aparece a cogeração é junto ao setor terciário. Neste caso toda a demanda de potência e calor pode ser bastada pelo sistema. Como no caso industrial, a potência produzida pode satisfazer parcial ou totalmente a demanda, ou ainda existir algum excedente. O calor obtido é utilizado para o aquecimento ou resfriamento de água, os quais podem servir, segundo as condições e características do setor (MAIDMENT & PROSSER, 2000; TASSOU et al., 2007; MAIDMENT et al., 1999).

Vale ressaltar que o fornecimento do excedente envolve aspectos institucionais específicos de cada país, variando de acordo com os decretos e leis estabelecidos por seus órgãos governamentais.

2.3 Caracterização dos ciclos e tipos

Os sistemas de cogeração são classificados basicamente em dois grandes grupos, *bottoming* e *topping*. Eles se diferem basicamente pela prioridade da geração de energia mecânica e térmica, ou seja, potência e calor, do ponto de vista do fluxo energético. (BELISÁRIO, 2012)

No sistema *Topping*, da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento ocorre para a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), e em seguida para o aproveitamento de calor útil. Esta configuração se baseia no aproveitamento do calor vindo de processos industriais para produção de vapor e posteriormente, expansão em turbinas para geração de potência eletromecânica. Enquanto no sistema *Bottoming*, da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento se dá para o aproveitamento de calor útil a elevadas temperaturas, e em seguida para a geração de energia eletromecânica. É típico de máquinas térmicas que tem por objetivo a queima de combustível para atender a demanda de eletricidade. Aproveitam-se, assim, os gases de exaustão da máquina para geração de vapor (BELISÁRIO, 2012).

A Figura 6 apresenta um esquema comparativo típico de sistemas de cogeração operando nos diferentes regimes: *Bottoming* e *Topping*.

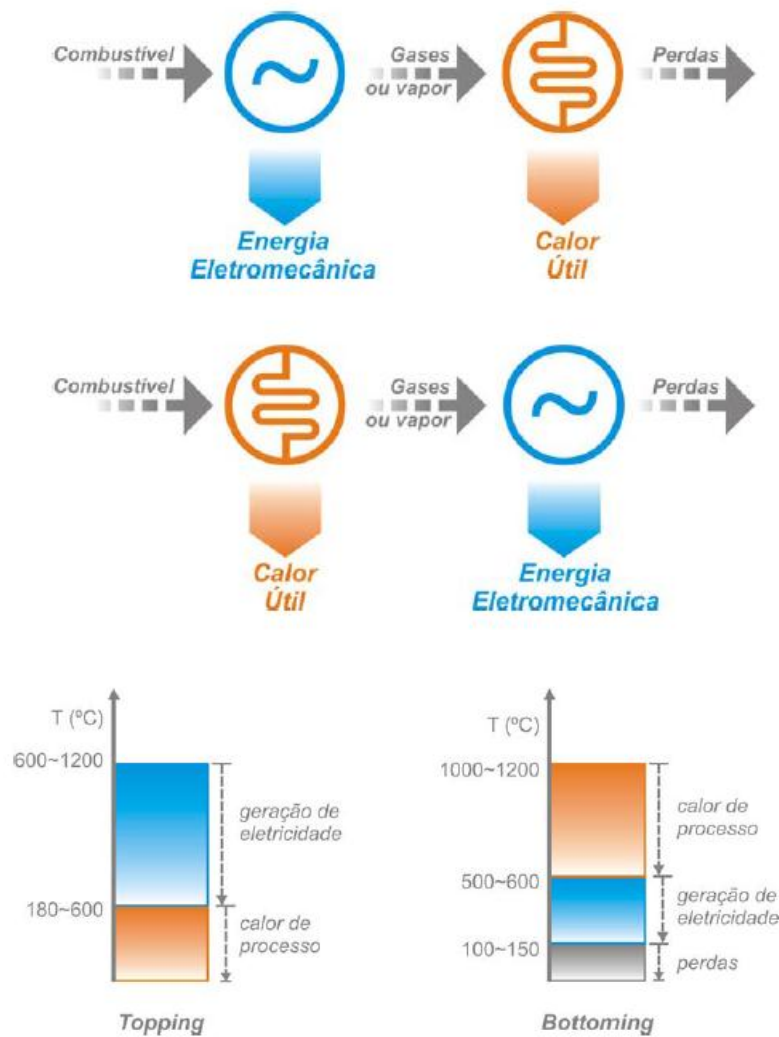


Figura 6: Sistema de cogeração em configuração *topping* e *bottoming*.
Fonte: COGEN, 2001.

Pode-se verificar na Figura 6, a racionalidade da cogeração em se aproveitar toda a faixa da temperatura disponibilizada pelo combustível, para a produção sequencial de eletricidade e calor útil.

É habitual a utilização de calor nas indústrias na faixa entre 120 e 200°C para geração de energia elétrica. Trabalha-se em níveis mais elevados de temperatura, entre 400 e 950°C. Sabendo que a temperatura de rejeição da geração termelétrica encontra-se mais elevada que a temperatura encontrada nos processos industriais é racional que se pense num sistema de cogeração do tipo *topping*, no qual o calor utilizado pelo processo industrial é aproveitado do rejeito da geração elétrica (CARVALHO, 2001).

Uma análise do setor ou instalação industrial pode ser realizada utilizando valores de demanda médios consumida. O parâmetro ALFA é calculado pela equação (LORA; NASCIMENTO, 2004):

$$ALFA = \frac{E_c}{Q_c} \quad (1)$$

Sendo ALFA a razão entre a energia elétrica e calor consumidos, E_c a energia elétrica consumida e Q_c o calor útil consumido.

Chamando de BETA (ou fator BETA) a razão potência-calor ofertada pela unidade de cogeração e de ALFA (ou fator ALFA) a razão potência-calor demandada a unidade de cogeração (SZKLO, 2001), e dimensionando-se esta unidade segundo duas estratégias básicas têm-se que:

- Estratégia 1: Paridade Elétrica, o sistema de cogeração é dimensionado para atender a demanda elétrica, ou seja, não há geração de excedentes elétricos nem necessidade de suplemento de eletricidade. Se $BETA > ALFA$, então o calor demandado é maior do que o calor suprido pelo sistema de cogeração, devendo haver o suplemento adicional de vapor;
- Estratégia 2: Paridade Térmica, o sistema de cogeração é dimensionado para atender a demanda térmica, ou seja, não há geração de excedentes nem necessidade de suplemento de calor.
 - Se $BETA < ALFA$, então a energia elétrica cogorada, é insuficiente para atender a demanda elétrica, devendo haver o suplemento adicional de eletricidade.
 - Se $BETA > ALFA$, então há geração de excedentes elétricos que podem ser vendidos à rede.

De modo geral, são admitidas quatro estratégias de operação para centrais de cogeração resumidas a seguir (BALESTIERI, 1994):

- Atendimento da demanda térmica (paridade térmica);
- Atendimento da demanda eletromecânica (paridade elétrica)
- Despacho econômico;
- Retirada da central de cogeração do sistema.

Para que um projeto de central de cogeração seja conceituado como adequado se faz necessário que atenda as demandas operacionais prescritas e garanta o nível de excedentes planejados nos períodos ajustados pelo processo, com confiabilidade e eficiência.

Quando não são obtidos esses resultados, as falhas na geração e a queda da eficiência ocasionam aumento dos custos de operação e manutenção, devido ao pagamento de multas contratuais e aumento nos custos dos combustíveis utilizados (BARREDA, 1999).

Podem-se subdividir os tipos de plantas de cogeração em função do ciclo utilizado para sua configuração (GARRIDO & FRAILE, 2008):

- Ciclo Rankine (ou a vapor);
- Ciclo Brayton (ou a gás);
- Ciclo Combinado;
- Ciclo Diesel.

A Tabela 1 exibe um resumo das características relevantes de algumas tecnologias utilizadas em centrais de cogeração enfatizando os aspectos positivos, negativos e a faixa de potência de energia elétrica gerada.

Tabela 1: Resumo das características das tecnologias de cogeração

Sistema	Vantagens	Desvantagens	Pot. Geração energia El.
Turbina a Gás	Alta confiabilidade	Requer gás a alta pressão ou compressor de gás	500 a 2.500 kW
	Baixa emissão de gases poluente	Baixa eficiência com carga parcial	
	Grande quantidade de energia térmica disponível	Rendimento depende das condições do ambiente	
	Não necessita de refrigeração	Tempo de instalação é alto	
Microturbina	Menor número de partes móveis (baixo desgaste)	Alto custo inicial	30 a 250 kW
	Pequenas dimensões e baixo peso	Relativamente baixo rendimento mecânico	
	Baixa emissão de gases poluentes	Limitada a sistemas de cogeração de baixa temperatura	
	Não necessita sistema de refrigeração		
	Tempo de instalação é baixo		
	Alta eficiência		
Motor a combustão interna (Ciclos Otto e Diesel)	Alta eficiência e possibilidade de operar com carga parcial	Alto custo de manutenção	Ciclo Otto até 8 MW
	Partida rápida	Limitado a sistemas de cogeração de baixa temperatura	
	Relativamente baixo custo de investimento	Alta taxa de emissão de gases poluentes (ciclo diesel)	Ciclo Diesel 4 a 80 MW
	Pode ser usado em locais remotos	Requer sistemas de refrigeração	
	Utiliza gás em baixa pressão	Alto nível de ruído	
Turbinas a Vapor	Alta eficiência	Partida lenta	50kW a 250 MW
	Flexibilidade de combustíveis	Alto custo de investimento	
	Capaz de atender a grandes demandas de calor	Operação precisa de pessoal especializado	
	Vida útil longa e de alta confiabilidade		
	Flexibilidade na relação potência/calor		
Células a Combustível	Baixa emissão de gases poluentes e baixo ruído	Alto custo inicial	5 kW a 2 MW
	Alta eficiência sobre toda faixa de potencia	Baixa durabilidade	
	Flexibilidade modular	Dependência de hidrogênio manufaturado	

Fonte: Andreos, 2013.

2.3.1 O ciclo Rankine

É o ciclo mais difundido mundialmente, sendo utilizado desde o final do século XIX, correspondendo à geração de vapor numa caldeira a partir de combustíveis em estado sólido, líquido ou gasoso que conseqüentemente movimentará uma turbina a vapor e produzirá eletricidade (BARREDA, 1999).

O que diferencia o ciclo Rankine dos demais é a combustão externa ao fluido de trabalho. Com isso se utiliza qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso (ex: bagaço de cana, madeira, lixo, óleo diesel, gás natural).

A Figura 7 é uma representação esquemática e um diagrama temperatura *versus* entropia, típico de um ciclo Rankine simples ideal.

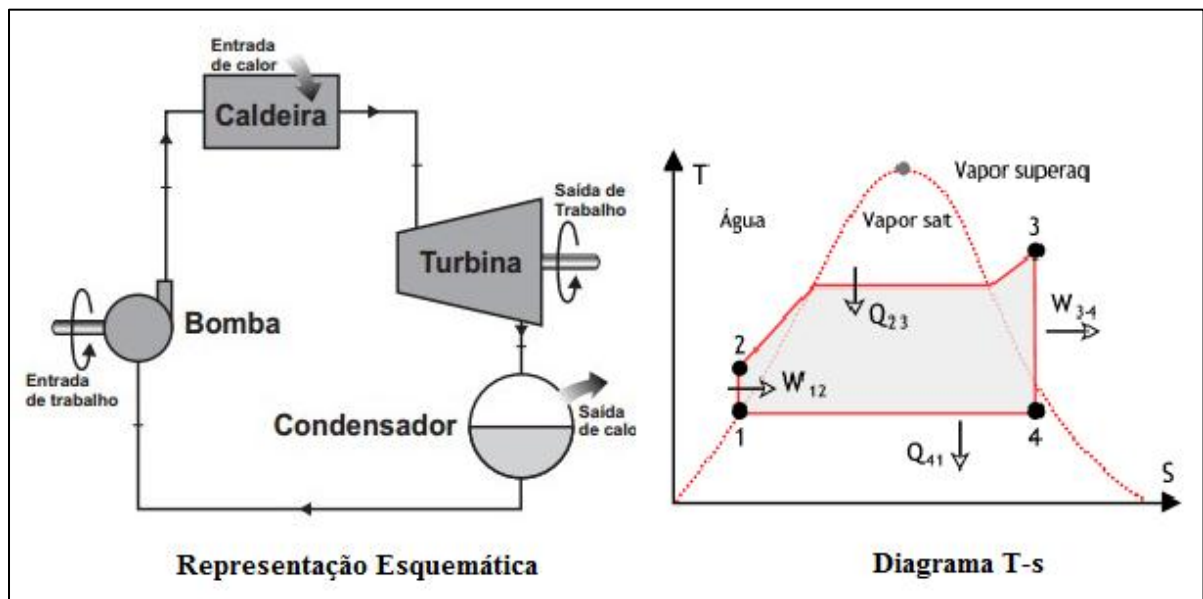


Figura 7: Ciclo Rankine Simples Ideal
Fonte: Çengel e Boles, 2006.

O ciclo Rankine é normalmente composto por uma caldeira, uma turbina a vapor, uma bomba e um condensador. “Modelo ideal de ciclo para ciclos de potência a vapor reais.” Ele é composto de quatro processos internamente reversíveis retratados da seguinte maneira (ÇENGEL e BOLES, 2006):

- 1-2: Processo de compressão adiabática reversível (isentrópica) na bomba.
- 2-3: Fornecimento de calor à pressão constante na caldeira.
- 3-4: Expansão isentrópica na turbina.
- 4-1: Rejeição de calor à pressão constante no condensador.

Analisando o diagrama T-s, observa-se que no ponto 1, a água no estado de líquido saturado é admitida na bomba e comprimida de maneira isentrópica até a pressão de operação da caldeira. Avaliando o regime como permanente, o processo como adiabático e desprezando a variação das energias cinética e potencial, a primeira Lei da Termodinâmica, para a bomba, pode ser dada como (ÇENGEL e BOLES, 2006; MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$w_{1-2} = (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Das relações termodinâmicas, sabe-se que: $Tds = dh - v dP$. Para a bomba: $dh = v dP$. Logo:

$$(h_2 - h_1) = v \times (P_2 - P_1) \quad (3)$$

$$w_b = v \times (P_2 - P_1) \quad (4)$$

Segundo Çengel (2006), na entrada da caldeira, ponto 2, a água entra como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido ou vapor saturado, estado 3. Tem-se a adição de calor a pressão constante. Da primeira lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial e considerando trabalho nulo na caldeira, o calor fornecido pode ser escrito como:

$$q_H = (h_3 - h_2) \quad (5)$$

De acordo com Morgan (2013), na turbina, o trabalho produzido através do fluido de trabalho que entra como vapor saturado seco ou superaquecido, ponto 3, e sai como vapor saturado úmido ou saturado seco, ponto 4, aplicando-se a primeira Lei da Termodinâmica, considerando o processo como adiabático e desprezando as variações de energia cinética e potencial, tem-se:

$$w_t = (h_3 - h_4) \quad (6)$$

No condensador ocorre a transferência do calor do fluido de trabalho que entra como vapor saturado úmido ou saturado seco e sai como líquido saturado. A Primeira Lei da Termodinâmica, desprezando as energias cinéticas e potenciais e sendo nulo o trabalho no condensador é dada por:

$$q_L = (h_1 - h_4) \quad (7)$$

O rendimento do Ciclo Rankine que é menor do que o rendimento do Ciclo Carnot, é representado da seguinte forma pelas equações:

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) + (h_1 - h_2)}{(h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_2) + (h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (9)$$

Sendo w_{liq} o trabalho líquido executado, q_H o calor fornecido ao sistema, q_L o calor retirado do sistema, w_t o trabalho realizado pela turbina e w_b o trabalho realizado pela bomba.

2.3.2 O ciclo Brayton

Também conhecido como ciclo de turbina a gás, foi proposto em 1870 por George Brayton com o intuito de ser empregado em um motor alternativo. A Figura 8 apresenta dois ciclos operacionais de uma turbina a gás: Ciclo Aberto e Ciclo Fechado. A turbina a gás consiste numa máquina de combustão interna de construção compacta, e que apesar do nome pode utilizar uma diversidade de combustíveis tanto líquidos quanto gasosos. A denominação de “turbina a gás” foi dada por consequência do seu fluido de trabalho, o ar. Na verdade, trata-se de uma máquina composta por diversos elementos, resumidamente pelo compressor, câmara de combustão e turbina (CHP CLUB, 2002).

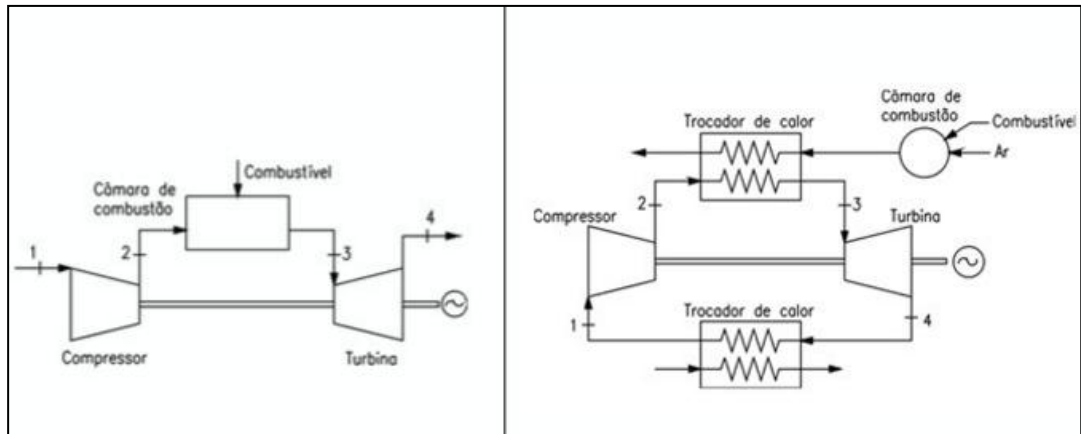


Figura 8: Os ciclos aberto e fechado de uma turbina a gás.
Fonte: Çengel e Boles, 2006 (Adaptado).

No ciclo aberto, o mais utilizado, como representado na Figura 9, o ar fresco nas condições do ambiente é admitido no compressor, ponto 1, local na qual são elevadas a temperatura e a pressão. O ar à alta pressão entra na câmara de combustão e é queimado à pressão constante. Posteriormente, os gases resultantes, na temperatura elevada, entram na turbina, ponto 3, e se expandem até a pressão atmosférica produzindo, neste processo, potência. No ponto 4, os gases “fatigados” pela turbina são lançados no ambiente, caracterizando assim, como ciclo aberto (ÇENGEL e BOLES, 2006).

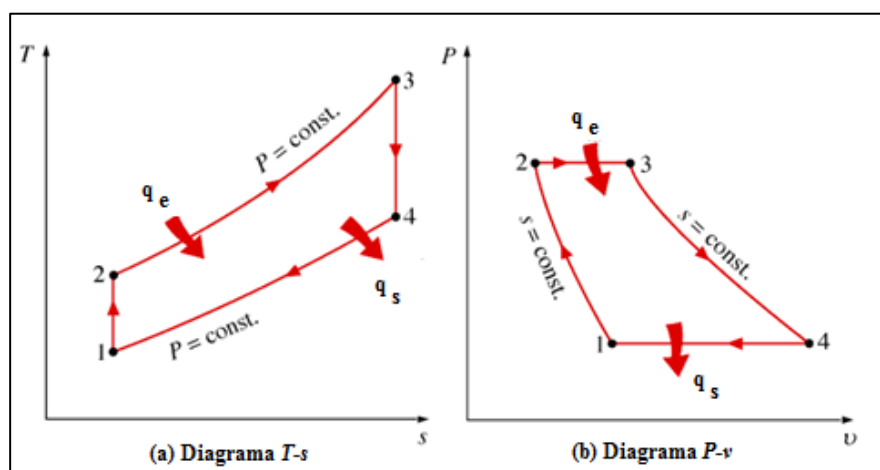


Figura 9: Diagrama $T-s$ e $P-v$ ciclo Brayton ideal.
Fonte: Çengel e Boles, 2006 (Adaptado).

No ciclo Brayton ideal, os diagramas representados na Figura 9, demonstram os quatro processos internamente reversíveis que ocorrem (ÇENGEL e BOLES, 2006):

- 1-2: Compressão isentrópica no compressor.
- 2-3: Fornecimento de calor à pressão constante.
- 3-4: Expansão isentrópica na turbina.
- 4-1: Rejeição de calor a pressão constante.

Empregando as relações de Maxwell (MORAN e SHAPIRO, 2013):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (10)$$

E definindo:

$$r_p = \text{razão de pressão} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (11)$$

Relacionando-se a razão de temperaturas e a razão de pressão, tem-se:

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_4} \quad (12)$$

E a eficiência se torna:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (13)$$

2.3.3 O ciclo Combinado

O ciclo combinado é o arranjo entre dois ou mais ciclos, com a principal finalidade de aumentar-se o rendimento global da planta. Seu princípio coincide com o da própria cogeração, caracterizado pelo aproveitamento da rejeição térmica de um ciclo primário de geração eletromecânica numa segunda máquina térmica, geralmente na proporção de 2:1. A

combinação mais utilizada é o arranjo entre o ciclo Brayton e o ciclo Rankine, nesta ordem, onde os gases de exaustão da turbina a gás, com temperaturas superiores a 550°C, são encaminhados à caldeira do ciclo a vapor, fazendo com que o rendimento elétrico total supere os 60%, contra 35% se os mesmos estivessem operando em separado. Contudo, existem três opções nas quais o ciclo combinado pode ser utilizado. A principal diferença entre elas é a forma como se faz a recuperação do vapor, podendo ser realizada antes ou depois da turbina a vapor. Assim sendo, estas configurações são: Contrapressão, Extração e Extração de vapor da caldeira de recuperação (CUNHA e SANTIAGO, 2002).

O acoplamento entre o ciclo Brayton (turbinas a gás), que é caracterizado pela alta temperatura dos gases de exaustão, e o ciclo Rankine (turbina a vapor e caldeira de recuperação), caracterizado por baixas temperaturas do vapor se comparado a dos gases de exaustão, propiciam uma alta eficiência de Carnot (BRUNETTI, 2008).

2.3.4 Ciclos Motores

Dois motores basicamente assumem papel de relevância quando se referem às máquinas a combustão interna, o ciclo Diesel e o ciclo Otto. Estas máquinas, inventadas no final do século XIX, são compostas de no mínimo um cilindro, contendo um embolo móvel e diversas peças móveis (SILVEIRA, 1994).

Os motores alternativos de ignição por compressão (ICO), também conhecidos como motor a diesel foi proposto por Rudolph Diesel e apresenta grande semelhança ao motor de ignição por centelha (ICE) tendo como principal diferença o início do processo de combustão. Nos motores a diesel, o ar é comprimido até uma temperatura acima da temperatura de autoignição do combustível, deste modo, inicia-se a combustão quando o combustível pulverizado, admitido na câmara por um dispositivo injetor, entra em contato com esse ar quente. Contudo, nos motores ICE, a mistura ar-combustível é inserida na câmara de combustão e uma centelha, produzida pela vela de ignição, faz com que ocorra a combustão desta mistura (ARTEAGA, 2010; ÇENGEL e BOLES, 2006).

Costa (2007) afirma que os tempos do motor ocorrem dentro do limite do cilindro que está compreendido entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), conforme representado na Figura 10.

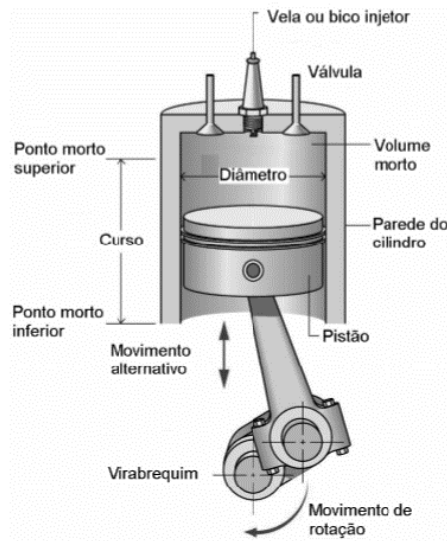


Figura 10: Conjunto pistão - cilindro de um motor de combustão interna.

Fonte: Moran e Shapiro (2013)

A cilindrada (C) corresponde a este limite entre os pontos mortos, tendo como equivalência o volume varrido pelo pistão no seu deslocamento do PMS até o PMI e cuja formulação é a seguinte (BRUNETTI, 2008):

$$C = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \text{Curso} \cdot N^{\circ} \text{ cilindros} \quad (14)$$

Sendo que D representa o diâmetro do pistão. A taxa de compressão (TC) é dada por: (ÇENGEL e BOLES, 2006)

$$TC = \frac{V_{PMIC}}{V_{PMS}} \quad (15)$$

Sendo que V_{PMI} representa o volume máximo dentro do cilindro, ou seja, no PMI e V_{PMS} o volume mínimo dentro do cilindro, no PMS.

O ciclo diesel é considerado o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por compressão (ICO). A Figura 11 apresenta os diagramas $T-s$ e $P-v$ do ciclo diesel ideal que modela os motores ICO (ÇENGEL e BOLES, 2006).

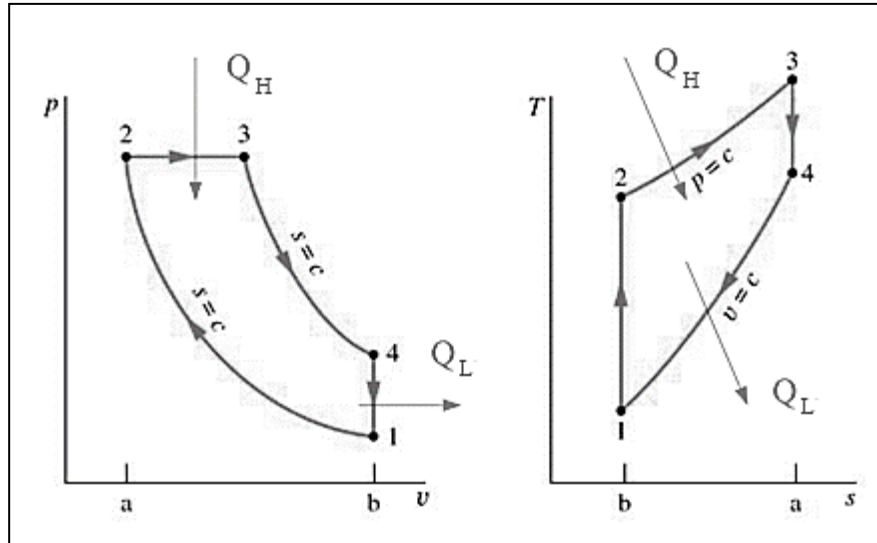


Figura 11: Diagramas $P-v$ e $T-s$ do ciclo diesel ideal.
Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2006).

Da Figura 11, observa-se que os diagramas $T-s$ e $P-v$ representam os quatro processos internamente reversíveis do ciclo diesel idealizado que são descritos da seguinte maneira:

- 1-2: ocorre a compressão a entropia constante (PMI \rightarrow PMS);
- 2-3: ocorre a adição de calor a pressão constante;
- 3-4: ocorre a expansão a entropia constante (posição \rightarrow PMI);
- 4-1: ocorre a rejeição de calor a volume constante (no PMI).

As equações a seguir modelam o ciclo termodinâmico ideal diesel (ÇENGEL e BOLES, 2006):

$$\frac{Q_H}{m} = \Delta h = C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (16)$$

$$\frac{Q_L}{m} = \Delta u = C_v \cdot (T_1 - T_4) \quad (17)$$

O trabalho do ciclo será (W_{ciclo}):

$$\frac{W_{\text{ciclo}}}{m} = \frac{Q_{\text{ciclo}}}{m} = \frac{Q_{\text{ent}} - Q_{\text{saida}}}{m} = C_p \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (18)$$

A eficiência térmica (η_t) será:

$$\eta_{t,Diesel} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{ent}}} \quad (19)$$

Através da equação do gás perfeito ($P \cdot v = m \cdot R \cdot T$), tem-se a seguinte relação:

$$P_1 \cdot v_1 = m \cdot R \cdot T_1 \quad (20)$$

Define-se a razão de corte (r_c), razão entre os volumes do cilindro após e antes do processo de combustão, como:

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (21)$$

Para os processos isentrópicos 1-2 e 3-4, tem-se:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = TC^{k-1} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = r_c^{k-1} \quad (22)$$

Logo a eficiência térmica do ciclo Diesel se reduz a:

$$\eta_{t,Diesel} = 1 - \frac{1}{TC^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (23)$$

De acordo com Costa (2007) na comparação entre dois motores que possuam a mesma cilindrada, o que registrar a maior PME apresenta a maior potência. No qual PME significa pressão média efetiva, ou seja, pressão hipotética constante capaz de desenvolver uma determinada potência. A PME pode ser definida como:

$$PME = \frac{W_{ciclo}}{V_{PMI} - P_{PMS}} \quad (24)$$

As vantagens que a tecnologia de cogeração compacta de motor de combustão interna têm sobre as outras tecnologias de cogeração são o baixo custo de capital, energia confiável no local, baixo custo operacional, facilidade de manutenção, e ampla estrutura de serviços. A energia recuperada da camisa do motor pode ser utilizada como água quente, na faixa de 85 a 90°C. Entretanto, a energia recuperada dos gases de exaustão pode ser empregada para a produção tanto de água quente quanto de vapor (ARTEAGA, 2010).

2.4 Indústria de Rodas de Liga Leve

A alta do preço dos combustíveis impulsionou a redução do peso dos carros. Carros mais leves consomem menos e, conseqüentemente, são mais eficientes. Devido a essa necessidade, várias pesquisas foram elaboradas em torno de materiais com peso inferior ao do aço, o qual é usado na fabricação de rodas (ALCOA, 2016).

Na década de 1940, fabricavam-se rodas de magnésio, contudo este material é de difícil tratamento, tanto na usinagem como na soldagem. Então, nos anos de 1970, iniciou-se a fabricação de rodas de liga leve, ou seja, ligas de alumínio/silício, que é um material de maior resistência mecânica e menor peso, além de ser um material mais fácil de ser trabalhado, o que prediz uma redução dos riscos de acidentes. Em comparação com as rodas de aço, as rodas de liga leve possuem peso 50% menor, resultando em uma redução significativa no peso total do veículo, o que ocasiona uma diminuição no consumo de combustível. Outro fator que favoreceu a utilização do alumínio foi a crescente produção do material na época (ALCOA, 2016).

De acordo com a *European Aluminium Association* (2012), em 2000, as rodas de alumínio equipavam cerca de 30 a 35% dos veículos de passageiros fabricados na Europa. Nos EUA e no Japão, essa fatia ultrapassava a marca de 50% do mercado. Isso representa mais de 14% do consumo médio de alumínio de um veículo. Nos Estados Unidos, a representatividade das rodas de alumínio, já em 1999, foi de 82% fundidas e 11% forjadas (incluindo todos os tipos de veículos). De acordo com o mesmo autor, na Europa, também em 1999, a participação das rodas de liga leve oriundas do processo de fundição, registrou um percentual maior que 85% para aplicação em caminhões.

2.4.1 Fabricação

Tipos de rodas

Existem três tipos de rodas no mercado internacional. Elas são conhecidas como *one-piece*, *two-pieces* e *three-pieces*, esta última também conhecida como *modular*. As rodas *one-piece* podem ser fundidas ou forjadas e depois usinadas, polidas, pintadas ou cromadas. As rodas *two-pieces* são formadas com um centro que pode ser fundido ou forjado e que depois

será soldado ou aparafusado a uma lateral que normalmente é forjada e depois usinada, o que garante à peça resistência mecânica e leveza elevadas. Já as rodas *three-pieces* são formadas de um centro e duas meia-laterais, que serão aparafusadas e soldadas umas às outras.

2.4.1.1 Processo de fabricação

Existem basicamente três tipos de processo de fabricação de rodas de alumínio. A fundida na qual se é despejado alumínio fundido em moldes em baixa pressão, na qual o alumínio derretido é comprimido à pressão dentro de moldes e as forjadas mais utilizadas em caminhões e ônibus. Porém, existem outros processos menos usuais, mas os principais e mais utilizados são os apresentados anteriormente (OFICINA DAS RODAS, 2013).

Rodas Fundidas

Fundição é definida como processo metalúrgico que consiste em obter um produto sólido a partir do metal em estado líquido, mediante solidificação desse metal em um molde. Existem muitas técnicas usadas em fundição de metais, sendo que a escolha do processo depende do tamanho, quantidade, complexibilidade da peça e qualidade superficial desejada para o produto acabado (FERREIRA, 1999).

De acordo com Torres (1975), a fundição é o processo para obterem-se objetos vazando metal fundido em um molde preparado com o formato da peça, deixando-se o material solidificar-se por resfriamento. A fundição é uma das técnicas mais antigas no campo de trabalho dos metais e data de aproximadamente 4000 AC, tendo sido empregados desde esta época inúmeros métodos para obtenção da peça fundida. São eles:

- Fundição em casca;
- Fundição em moldes metálicos (por gravidade ou sob pressão);
- Fundição centrífuga;
- Fundição de precisão.

De acordo com Torres (1975), para a fabricação de materiais com liga de alumínio é usual a utilização do método de fundição em moldes permanentes ou por gravidade ou sob pressão.

No processo de fundição em moldes permanentes alimentados por gravidade, o molde metálico é preenchido unicamente pela ação da gravidade. Neste caso, geralmente a matriz

(molde) é aberta e fechada manualmente, sendo passível, entretanto, de mecanização. Os machos (molde utilizado para fabricar peças ocas) usados podem ser metálicos ou de areia. Os de areia são usados quando, devido a sua complexidade, fica difícil sua retirada da peça pronta, ou quando não se exige grande precisão e acabamento do furo (TORRES, 1975).

Ainda segundo Torres (1975), a fundição sob pressão, como no processo de fundição em moldes permanentes por gravidade, utiliza moldes metálicos pré-aquecidos, também chamados de matrizes, só que a alimentação do metal fundido é feita sob pressão. A pressão assegura um bom preenchimento da cavidade do molde com o metal, produzindo seções bastante finas e detalhadas, garantindo a isenção de porosidade nas seções da peça. A produtividade desse processo é extremamente elevada, podendo chegar a produzir até 1000 peças por hora.

O processo

Torres (1975) afirma que a fundição sob pressão é sempre feita através de máquinas apropriadas que fecham e travam as matrizes, injetam o metal sob pressão dentro dos moldes, enquanto que os gases que estavam em seu interior são expulsos através de ventilações na emenda das duas partes, que compõem o molde, como mostrado na Figura 12. Logo que a peça se solidifica, as matrizes se abrem e o fundido é ejetado através de pinos extratores. Enquanto as matrizes estão abertas elas são limpas e lubrificadas para a próxima operação.

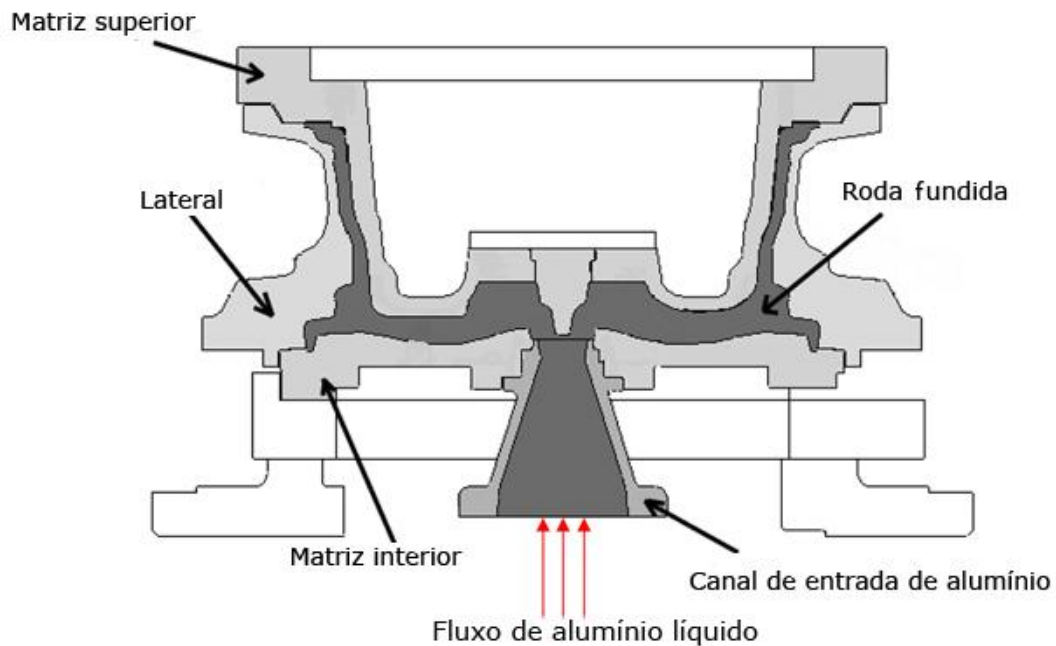


Figura 12: Desenho esquemático do conjunto de moldes e roda injetada mostrando a região de injeção.
Fonte: Volcano, 2016.

Devido às propriedades das ligas de alumínio a máquina mais utilizada para a fabricação de rodas de liga leve são as máquinas de ação por êmbolo com câmara fria. Esse tipo de máquina o metal fundido não está em contato com a câmara de pressão de forma contínua, mas unicamente é introduzida em cada injeção a quantidade necessária de metal em estado pastoso. O cilindro transmite a pressão necessária para a injeção e serve para a manobra de fechamento e abertura da matriz. A pressão nesse tipo de máquina varia entre 200 a 2000 atm. A produção pode atingir 500 peças por hora.

Vantagens da fundição sob pressão são (BUHLER,2016):

- Produção de formas mais complexas;
- Produção de peças de paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas;
- Alta capacidade de produção;
- Produção de peças quase que acabadas;
- Utilização da mesma matriz para milhares de peças, sem variações significativas nas dimensões das peças produzidas;
- As peças fundidas sob pressão podem ser tratadas superficialmente por revestimentos superficiais, com um mínimo de preparo prévio da superfície;

- Algumas ligas, como a de Alumínio, apresentam maiores resistências do que se forem fundidas em areia.

As desvantagens da fundição sob pressão são (BUHLER,2016):

- As dimensões das peças são limitadas - normalmente seu peso é inferior a 5kg; raramente ultrapassa 25kg;
- Dificuldade de evasão do ar retido no interior da matriz dependendo dos contornos das cavidades e dos canais; o ar retido é a principal causa de porosidade nas peças fundidas;
- Os equipamentos e os acessórios são relativamente caros, de modo que o processo somente se torna econômico para grandes volumes de produção;
- Processo com poucas exceções, só é empregado para ligas cujas temperaturas de fusão não são superiores às da liga de cobre.

Rodas Forjadas

De acordo com a ABAL (2016), as rodas forjadas de alumínio são conformadas a partir de um bloco único de metal por forjamento a quente e operações posteriores de tratamento térmico (que maximiza as propriedades de resistência mecânica), usinagem de alta precisão (que assegura que cada roda seja perfeitamente balanceada, eliminando vibrações quando em movimento e garantindo menor desgaste dos pneus e maior conforto ao dirigir) e acabamento (como ataques químicos e pintura). As ligas padrão mais utilizadas são: EN AW- $AlSi1MgMn$ (6082) na Europa, e AA 6061($AlSiMgCu$) nos Estados Unidos.

De acordo com a Alujet (2015), o processo de fabricação das rodas de liga leve consiste nas etapas:

- Recebimento e aquecimento do *blank*;
- Forjamento;
- Repuxo inicial;
- Tratamento térmico de solubilização;
- Repuxo final e usinagem inicial;
- Usinagem final;
- Tratamento térmico complementar;
- Acabamento.

As rodas forjadas se originam de uma peça com certa espessura, chamada de *blank*. O processo é iniciado com o aquecimento do *blank*, que é obtido anteriormente pelo processo de fundição ou extrusão. O aquecimento é feito em fornos e visa a plastificação do material. Após isso, o *blank* ainda aquecido é recebido no processo de forjamento do cubo e do aro (corpo da roda) onde é conformado em múltiplas operações. Esta operação gera se necessário, rebaixos ou furos que podem ser necessários nas próximas etapas do processo (ALUJET, 2015).

O repuxo inicial consiste em fixar o corpo forjado da roda em um mandril que será utilizado como gabarito para a conformação preliminar da superfície interna da tala. A conformação é feita por dois roletes que distribuem o material previamente localizado junto ao cubo pela superfície do mandril. Estes roletes devem estar localizados em posições diametralmente opostas e, caso isso não seja possível, o processo pode ser realizado em duas etapas diferentes, sendo que o primeiro rolete deve ser o de maior diâmetro (ALUJET, 2015).

Após o repuxo inicial, é realizado o tratamento térmico de solubilização, que tem a finalidade de preparar o material para o repuxo final, através da redução da quantidade de discordâncias geradas no processo de forjamento e repuxo inicial, além de solubilizar o magnésio e silício, que serão posteriormente precipitados. O processo é realizado à temperatura de 500°C por 6 horas (ALUJET, 2015).

Após o tratamento térmico, o corpo com a tala já preliminarmente formado é montado em novo mandril que tem a forma interna final da tala e das bordas. Esta conformação também é feita simultaneamente por dois roletes. Na mesma operação, é desejável que seja realizada também a usinagem do furo e da superfície de apoio da roda (ALUJET, 2015).

Um novo processo de usinagem é realizado para conferir os furos de fixação, a superfície de assentamento do pneu, as bordas e o furo da válvula.

A peça recebida do processo de usinagem é então submetida ao tratamento térmico complementar. Normalmente, este tratamento envolve uma etapa de solubilização (exatamente como feito no tratamento térmico de solubilização), seguido de uma etapa de precipitação feita a 185°C por 5 horas. Como já foi realizada o tratamento térmico de solubilização, só é contemplada neste tratamento complementar a etapa de precipitação. Esta operação tem por finalidade precipitar de maneira coerente o magnésio e silício que estavam anteriormente solubilizados (ABAL, 2016).



Figura 13: Etapas de forjamento de rodas de alumínio.
Fonte: ABAL, 2016.

Como visto na Figura 13, na conclusão do processo de conformação e de tratamento térmico, o produto já está adequado para uso, faltando-lhe apenas a fase de acabamento estético, quando desejado. Nesta etapa podem ser utilizados diversos tipos de acabamento, que vão desde simples pintura a processos mais complexos, como cromatização e diamantação.

2.5 Seleção e configuração da central

De acordo com Silveira (1994), para configuração de um sistema de cogeração é necessário caracterizar a unidade de processo (segmento industrial ou terciário) segundo o fluxo energético associado. Assim, utiliza-se o parâmetro adimensional ALFA. O valor de ALFA se altera de acordo com cada setor, subsetor ou indústria e dentro de certa faixa em razão das diferenças tecnológicas e/ou fatores regionais.

Segundo Balestieri (2002), o planejamento de uma central de cogeração ainda contempla outros parâmetros que são essenciais para o seu estabelecimento. Destaca-se, então:

- Razão entre calor e potência elétrica (*heat-to-power ratio*) que caracteriza cada equipamento usado no sistema de cogeração;
- Consumo específico de vapor (*steam rate*) [kg/kWh];
- Consumo específico de combustível [kg/kWh];

- Consumo específico de calor (*heat rate*) [kJ/kWh];
- Eficiência termodinâmica global do equipamento;
- Variações da eficiência sob cargas parciais;
- Temperatura do fluxo térmico retirado do equipamento [°C];
- Limite de rejeição do equipamento;
- Disponibilidade e confiabilidade do equipamento.

A razão calor/potência elétrica (*heat-to-power ratio*) de uma máquina térmica é a razão entre duas variáveis: E' que representa a potência elétrica gerada [kWe], estando reunidas as formas geradas mecânica e/ou elétrica e S' que é a potência térmica gerada [kWth], associando as potências térmicas na forma de vapor e/ou água quente e/ou água gelada, todas obtidas pela central de cogeração a partir de sua operação em plena carga ou em carga parcial. A Tabela 2 mostra a razão calor/potência elétrica de componentes do sistema de cogeração.

Tabela 2: Razão Calor/potência elétrica e outros parâmetros do sistema de cogeração

Sistema de cogeração	Razão calor/potência (kWth/kWe)	Potência de saída (como % da entrada do combustível)	Eficiência global (%)
Turbina a vapor de contrapressão	4,0 – 14,3	14 – 28	84 – 92
Turbina a vapor de extração-condensação	2,0 – 10	22 – 40	60 – 80
Turbina a gás	1,3 – 2,0	24 – 35	70 – 85
Ciclo combinado (turbina a gás + turbina a vapor)	1,0 – 1,7	34 – 40	69 – 83
Motor de combustão interna	1,1 – 2,5	33 – 53	75 – 85

Fonte: Devki Energy Consultancy, 2006.

Balestieri (2002) afirma que a eficiência global de cogeração é calculada a partir da razão entre todas as formas de energia efetivamente aproveitada no ciclo e o calor produzido

pela queima do combustível. Seu valor varia geralmente entre 70 e 90% e é obtido através da seguinte equação:

$$\eta_{g,cog} = \frac{E' + S'}{\sum m_{c,l} PCI_l} \quad (25)$$

Balestieri (2002) ainda indica que de forma geral, as estratégias de operação admitidas para os sistemas de cogeração se resumem em três aspectos: paridade térmica ou atendimento da demanda térmica, paridade elétrica ou atendimento da demanda eletromecânica e operação econômica.

No regime de paridade térmica, o sistema de cogeração é projetado e operado de forma a ser capaz de fornecer as necessidades térmicas da planta industrial, ou seja, o calor é o produto principal e a eletricidade é o subproduto do sistema de cogeração. Assim, o sistema deve estar interligado à rede concessionária local para, dependendo das condições operacionais e de sua demanda, se abastecer de energia elétrica do concessionário ou fornecer o excedente de eletricidade à rede concessionária. No regime de paridade elétrica, ocorre o contrário, o sistema de cogeração é projetado e operado de forma a atender as necessidades de energia elétrica da planta industrial, sendo seu produto principal. O calor é o subproduto da cogeração. Se o calor gerado for insuficiente para atendimento do processo de produção fabril, é necessário ter um sistema auxiliar anexo para satisfazer a demanda. Caso contrário, o calor adicional é rejeitado para o meio ambiente, (BALESTIERI, 2002).

O regime de operação econômica é aquele no qual o sistema opera de acordo com parâmetros econômicos. É orientado a suprir parte, totalidade ou ainda produzir excedente da demanda elétrica de pico, conforme a eletricidade é adquirida ou vendida sob uma tarifa mais elevada. Dessa forma há a opção de comprar eletricidade da concessionária para completar o seu suprimento, ou, se for o caso, vender o excedente. Para que isso seja factível, há a necessidade de se utilizar um equipamento suplementar para satisfazer parte ou a totalidade da sua demanda térmica, quando necessário, dependendo das condições operacionais da planta de cogeração (SILVEIRA, 2009).

Segunda Silveira (2009), ainda pensando numa seleção adequada dos ciclos devem-se considerar algumas outras características da unidade, seguindo uma análise do processo produtivo que estão reunidas em três grupos:

- Na unidade de processo: vincula-se: quantidade e fluxos de massa de calor requeridos com seus respectivos níveis de temperatura; curvas de carga da potência eletromecânica (E) e térmica (S) com variações diárias e sazonais; picos de potência e calor alcançáveis e componentes de demanda contínua.
- Componentes do processo: existência de equipamentos de resfriamento, geradores de água quente e bombas de calor.
- Combustíveis englobam a: disponibilidade e limitações, inclusive os resíduos e efluentes gerados; capacidade de armazenamento e utilização em equipamentos (GORGES apud BALESTIERI, 2002).

As relações mostradas nesse capítulo serão utilizadas para compor o capítulo 4, que é de resultados e discussões.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve a característica do desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de determinar a sua natureza e classificação, a área da pesquisa, método e instrumentos de coleta utilizados assim como as variáveis e indicadores adotados, para que possam ser feitas as análises e cálculos necessários.

3.1 Tipo de Pesquisa

Gressler (2004) afirma que é habitual chamar pesquisa a uma simples coleta de dados. A coleta, entretanto, corresponde apenas a uma das etapas do processo de pesquisa.

Segundo Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, ou seja, é uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico, sendo o objetivo fundamental da pesquisa, mediante o uso de procedimentos científicos, encontrar soluções para um problema.

Do ponto de vista de abordagem do problema, as pesquisas apresentam uma classificação bastante ampla, tendo duas grandes abordagens: quantitativa e qualitativa.

Para o modelo qualitativo, Gressler (2004, p.43) diz:

Essa abordagem é utilizada quando se busca descrever a complexidade de determinado problema, não envolvendo manipulação de variáveis e estudos experimentais. Por meio dela, reúnem-se informações sobre os fenômenos investigados com o uso de entrevistas abertas e não direcionadas, depoimentos, histórico de ocorrência dos fatos, estudo de casos.

Já a pesquisa quantitativa, para Silva (2001), é todo o tipo de informação que pode ser traduzida em números utilizando métodos estatísticos, as opiniões e dados obtidos de acordo com os boletins de informação e pesquisa de campo.

Quanto aos fins, uma pesquisa é classificada por Vergara (1997) como sendo exploratória, descritiva, explicativa, metodológica, aplicada e intervencionista.

Gil (1999) classifica a pesquisa como exploratória, na qual sua finalidade é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, tendo em vista, hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, envolvendo levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso.

Já a pesquisa descritiva, segundo Vergara (1997), expõe características de determinada população ou de determinado fenômeno. Pode também estabelecer correlações entre variáveis e definir sua natureza. Não tem compromisso de explicar os fenômenos que descreve, embora sirva de base para tal explicação.

Para Gil (1999), a investigação explicativa identifica os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

A pesquisa metodológica, de acordo com Vergara (1997), é o estudo que se refere a instrumentos de captação ou de manipulação da realidade. Está, portanto, associada a caminhos, formas, maneiras, procedimentos para atingir determinado fim.

A pesquisa aplicada é destacada por Vergara (1997) como sendo fundamentalmente motivada pela necessidade de resolver problemas concretos, mais imediatos, ou não. Tem, portanto, finalidade prática.

Por fim, Vergara (1997) afirma que a investigação intervencionista tem como principal objetivo, interferir na realidade estudada, para modificá-la. Distingue-se da pesquisa aplicada pelo compromisso de não somente propor resoluções de problemas, mas também resolvê-los efetiva e participativa.

Quanto aos meios de investigação, Vergara (1997) classifica uma pesquisa como: de campo, de laboratório, telematizada, documental, bibliográfica, experimental, *ex post facto*, participante, pesquisa-ação e estudo de caso. Dentre essas classificações, serão destacadas apenas aquelas que serão utilizadas nesse trabalho.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas, sejam estas impressas ou digitalizadas e obtidas via Internet, e também por meio de dados que se obtém através de estudo de casos e experimentos. Já a pesquisa experimental, está mais próxima às Ciências Naturais, sendo a grande responsável pelos maiores avanços científico, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, com o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas especiais, e equipamentos adequados.

Fonseca (2002) especifica pesquisa documental como sendo elaborada através das mais diversas fontes sem tratamentos analíticos. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa participante caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas.

Já a pesquisa-ação é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita associação com uma ação ou resolução de um problema no qual os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Segundo Yin (2001), estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Para Gil (1999), os exemplos mais característicos desse tipo de pesquisa são os de investigações sobre ideologias ou aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema. Estudo de caso é o circunscrito a uma ou poucas unidades, entendidas essas como um produto, uma empresa ou um órgão público. Tem caráter de profundidade e detalhamento.

Tendo em vista o critério de classificação nas informações apresentadas, o presente trabalho apresenta caráter quantitativo. De acordo com Alyrio (2008) este trabalho quantifica o nível de conhecimento e procurar observar o alcance do tema, do ponto de vista do universo pesquisado, pois utilizam de dados numéricos, cálculos e processo de análise estatístico, deixando de lado resultados alcançados por observações e interpretações. O presente trabalho ainda abrange uma pesquisa de caráter bibliográfico, visto que é fundamentado em uma variedade de livros, teses, dissertações, artigos e internet, com o objetivo de enriquecimento teórico para realização do estudo proposto.

3.2 Materiais e Métodos

Vergara (1997) define método como sendo um caminho, uma forma, uma lógica de pensamento. Portanto, os métodos que serão utilizados na pesquisa estão apresentados na Figura 14. No qual se inicia com a revisão bibliográfica necessária e caminha-se para a identificação das necessidades da empresa. Logo após, coleta-se os dados e faz-se uma análise de mercado. Assim levantam-se as propostas de sistemas de cogeração baseado nos dados coletados e finaliza-se com os cálculos e conclusões acerca do proposto.

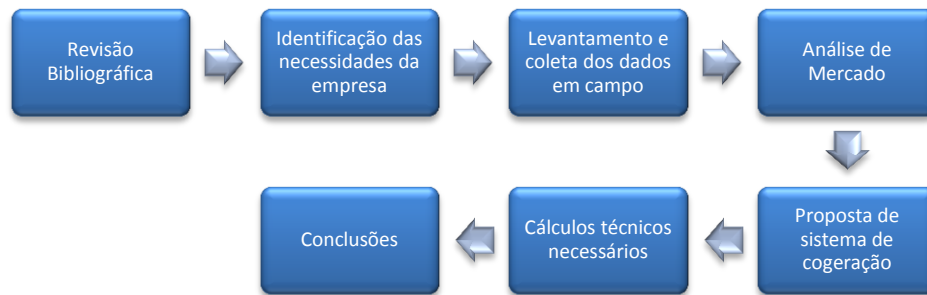


Figura 14: Fluxograma das etapas da monografia.

Fonte: Pesquisa Direta (2015).

3.3 Variáveis e Indicadores

Gil (1999) afirma que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação.

A Tabela 3 revela quais são as variáveis pertinentes à pesquisa, bem como seus respectivos indicadores.

Tabela 3: Variáveis e indicadores de pesquisa.

Variáveis	Indicadores
Demanda energética	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de combustível no processo; • Consumo de água; • Consumo de eletricidade; • Projeção de demanda energética
ALFA	<ul style="list-style-type: none"> • Potência eletromecânica consumida no segmento; • Potência térmica consumida no segmento.
Modo de operação do sistema de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • Paridade térmica; • Paridade elétrica; • Despacho Econômico.
Seleção dos ciclos de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • $1/ALFA$; • Demandas energéticas da empresa; • Processo Produtivo; • Temperatura desejada no processo produtivo; • Vazão de combustível; • Pressão de vapor desejada no processo produtivo.
Eficiência térmica do ciclo de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • Eletricidade produzida no ciclo; • Calor de processo fornecido pelo ciclo; • Energia gasta no ciclo.

Fonte: Pesquisa Direta (2015)

A partir do conhecimento das variáveis e dos seus respectivos indicadores é possível obter um maior controle sobre o estudo no que diz respeito a valores e mensurações.

3.4 Instrumento de coleta de dados

A fim de obter o embasamento necessário para a pesquisa, nesta etapa acontece a coleta de dados em cima do tema abordado através de revisões bibliográficas, observações e experimentos.

Com o auxílio de livro, teses, dissertações, catálogos e uma ampla pesquisa bibliográfica, associada com uma observação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos além de uma vasta análise sobre o estudo de caso, esta pesquisa é de cunho bibliográfico quantitativo e descritivo e tem por finalidade conseguir informações uteis para realizar uma comparação entre os dados reais encontrados e na teoria por meio de modelagens matemáticas.

3.5 Tabulação dos dados

Para tabulação dos dados serão utilizados os *softwares*: Microsoft Word e Microsoft Excel. A partir dos dados obtidos pela teoria, serão realizados cálculos, tabelas e gráficos pelo *software* Excel, que permite maior facilidade na resolução dos cálculos e melhor visualização dos dados propostos neste trabalho. O *software* Microsoft Word será utilizado para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia que é utilizada neste trabalho, contendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis, bem como seus respectivos indicadores, as formas de coleta de dados e como os mesmos serão registrados e analisados. Sendo assim, pode-se vislumbrar melhor como ocorreu o desenvolvimento desse trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterizações da empresa

A indústria é dedicada à produção de rodas de liga leve e possui mais de 70 modelos diferenciados e de alta resistência. Situada em Mairinque –SP, a fábrica com mais de 100 funcionários, já produziu mais de 400 modelos aplicáveis aos veículos brasileiros, com certificação ISO 9000 de qualidade.

A demanda elétrica contratada atualmente é de 590 kW. A empresa possui contrato de fornecimento de energia elétrica e fornecimento de gás natural, sendo essas suas principais fontes de energia.

Possui uma demanda média mensal de 635 kW de energia elétrica e 49.600 m³ de gás natural, o que equivale a 770 kW de energia térmica, que é distribuída por toda a planta como pode ser observado na Figura 15 e Figura 16. A energia elétrica é utilizada para o bombeamento de água, geração de calor, ventilação em sistemas de arrefecimento, entre outros equipamentos. O gás natural é principalmente utilizado para aquecimento da cadinho responsável pelo derretimento das placas de alumínio.

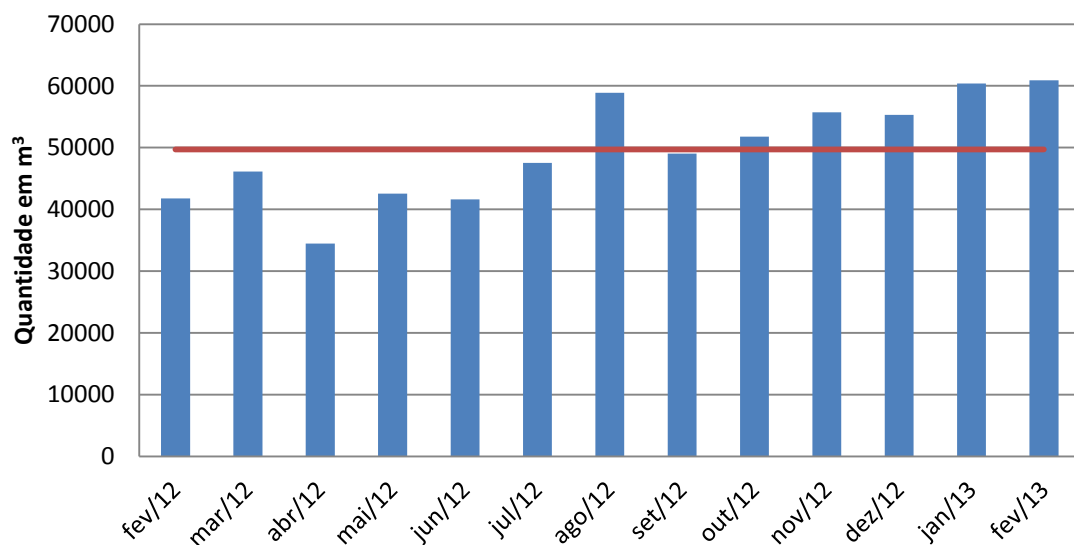


Figura 15: Consumo de gás natural por mês.
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Como pode ser observado na Figura 16, o consumo de energia elétrica é sazonal variando de 550kW a 730kW. A média de consumo é de 634kW que é acima da Demanda Contratada de 590kW e do Limite para Multa de 619kW. Logo, em quase todos os meses a empresa se submete a pagar altas taxas de multa.

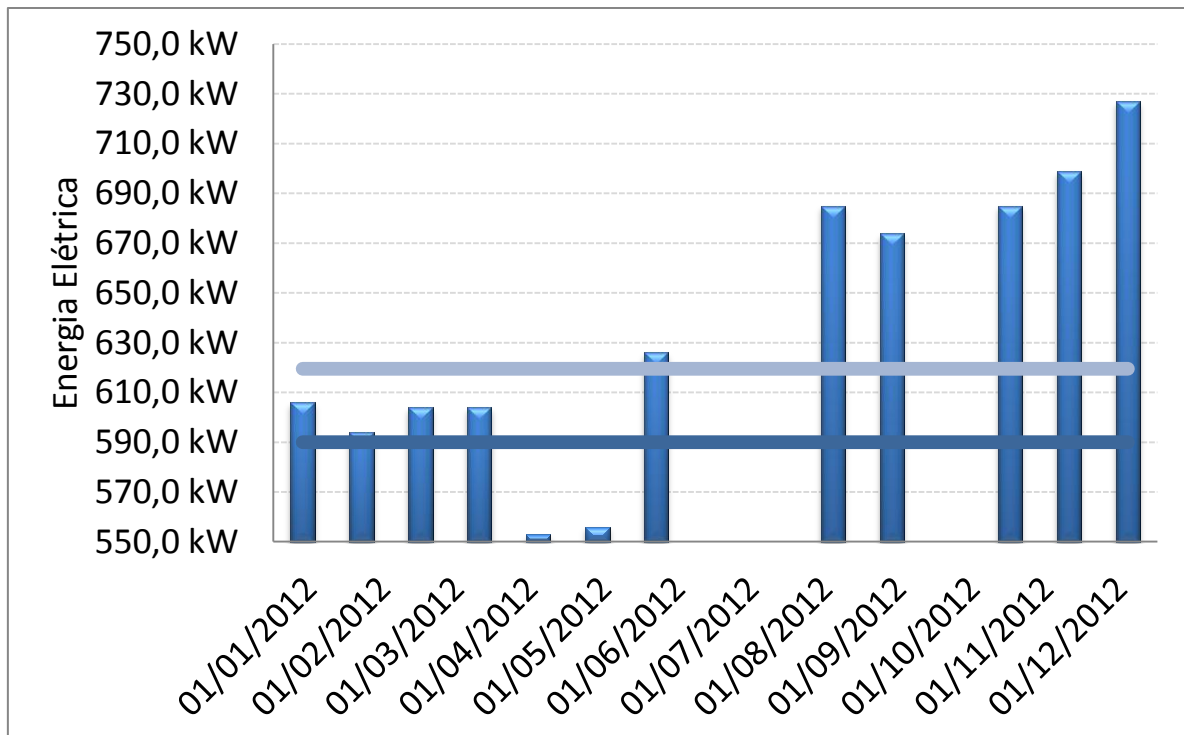


Figura 16: Demanda de energia elétrica registrada e contratada pela empresa entre os anos de 2012 e 2013.
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Pode-se observar um aumento no consumo, tanto de energia elétrica quanto de gás natural, pela empresa. Isso se deve à crescente demanda nos anos analisados. Contudo, de acordo com a Fenabrave, Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores, nos primeiros 6 meses do ano de 2016, os emplacamentos do setor seguiram caindo em relação aos períodos anteriores, retornando aos patamares de 2002. No período apresentado na Tabela 4, a comercialização total do setor apresentou, na média, redução de 48% nos emplacamentos. De todos os segmentos, os caminhões são aqueles com pior desempenho no período, seguido pelo setor de ônibus.







Tabela 4: Média de vendas por semestre.

	Total	Automóveis e Comerciais Leves	Caminhões	Ônibus	Motos
Média a Jan-Jun13	429.866	284.631	12.334	2.861	124.712
Média a Jul-Dez13	462.296	311.351	13.425	3.262	127.902
Média a Jan-Jun14	401.544	263.762	10.765	2.613	119.618
Média a Jul-Dez14	429.215	291.024	12.077	2.727	118.703
Média a Jan-Jun15	329.254	211.637	6.232	1.957	106.965
Média a Jul-Dez15	316.108	201.167	5.730	1.433	105.242
Média a Jan-Jun16	257.224	158.519	4.238	1.161	91.180

Fonte: Fenabreve, 2016.

De acordo com a Tabela 5, a venda de veículos leves caiu 4% em janeiro de 2017 na comparação com o mesmo período de 2016. Foram emplacadas 143.582 unidades de automóveis e comerciais leves, contra 149.677 no primeiro mês de 2016. Na comparação com dezembro, mês tradicional de vendas fortes, a queda foi maior, de 28%.

Tabela 5: Número de emplacamentos.

Segmentos	2017	2016	2017	2016	2016	Variação		
	Jan (A)	Dez (B)	Acumulado (C)	Jan (D)	Acumulado (E)	(A)/(B)	(A)/(D)	(C)/(E)
 A) Autos	121.399	169.978	121.399	131.253	131.253	-28,58▼	-7,51▼	-7,51▼
 B) Com. Leves	22.183	29.022	22.183	18.424	18.424	-23,56▼	20,40▲	20,40▲
A + B	143.582	199.000	143.582	149.677	149.677	-27,85▼	-4,07▼	-4,07▼
 C) Caminhões	2.940	4.446	2.940	4.346	4.346	-33,87▼	-32,35▼	-32,35▼
 D) Ônibus	707	927	707	1.254	1.254	-23,73▼	-43,62▼	-43,62▼
C + D	3.647	5.373	3.647	5.600	5.600	-32,12▼	-34,88▼	-34,88▼
Subtotal	147.229	204.373	147.229	155.277	155.277	-27,96▼	-5,18▼	-5,18▼
 E) Motos	67.606	83.665	67.606	96.226	96.226	-19,19▼	-29,74▼	-29,74▼
 F) Impl. Rod.	1.526	1.846	1.526	1.719	1.719	-17,33▼	-11,23▼	-11,23▼
Outros	7.803	9.014	7.803	7.687	7.687	-13,43▼	1,51▲	1,51▲
Total	224.164	298.898	224.164	260.909	260.909	-25,00▼	-14,08▼	-14,08▼

Fonte: Fenabreve (2016).

De acordo com a Petrobrás (2014), a composição percentual típica do gás natural é: Metano 81,57%, Etano 9,17%, Etano 5,13%, Propano 0,94%, i-Butano 0,94%, n-Butano 1,45%, i-Pentano 0,26%, n-Pentano 0,30%, Hexano 0,15%, Heptano e superiores 0,12%,

Nitrogênio 0,52%, Dióxido de Carbono 0,39%. A partir dessas porcentagens consegue-se adquirir o PCI do gás natural necessário para os cálculos de ALFA, no qual pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6: Base de cálculo do PCI do gás natural.

Componente	Associado ⁽¹⁾	PCI [kJ/kg]	P.M. [kg/kmol]	%Massa	ρ [kg/m ³]	PCI [kJ/Nm ³]
Metano	81,57%	50016,00	16,043	0,639	0,656	32797,42
Etano	9,17%	47489,00	30,069	0,135	1,229	58365,63
Propano	5,13%	46357,00	44,096	0,111	1,802	83552,54
i-Butano	0,94%	45742,00	58,123	0,027	2,376	108669,66
n-Butano	1,45%	45742,00	58,123	0,041	2,376	108669,66
i-Pentano	0,26%	45355,00	72,150	0,009	2,949	133753,96
n-Pentano	0,30%	45355,00	72,150	0,011	2,949	133753,96
Hexano	0,15%	45105,00	86,177	0,006	3,522	158877,06
Heptano e superiores	0,12%	44926,00	100,203	0,006	4,096	184002,45
Nitrogênio	0,52%	0,00	28,013	0,007	1,145	0,00
Dióxido de Carbono	0,39%	0,00	44,011	0,008	1,799	0,00
TOTAL	100%	48999,70	20,466	100,00%	1,0731	40196,57

Fonte: Pesquisa Direta (2017)

A partir dos dados apresentados anteriormente, define-se resumidamente na Tabela 7 as necessidades energéticas e o ALFA, que caracterizam o cenário analisado da indústria de rodas de liga leve. Assumindo que a demanda da produção está em queda devido à crise instaurada no país, admite-se que o sistema manterá a média de produção de 2012-2013 para base de cálculos e análises do sistema de cogeração.

Tabela 7: Parâmetros de caracterização das necessidades da indústria.

Mês	Consumo de gás (m ³ /mês)	Demanda elétrica	Demanda térmica	ALFA	1/ALFA
fev/12	41753,63	606,0 kW	647,51 kW	0,94	1,07
mar/12	46102,63	594,0 kW	714,96 kW	0,83	1,20
abr/12	34459,91	604,0 kW	534,40 kW	1,13	0,88
mai/12	42532,93	604,0 kW	659,60 kW	0,92	1,09
jun/12	41596,53	553,0 kW	645,08 kW	0,86	1,17
jul/12	47503,32	556,0 kW	736,68 kW	0,75	1,32
ago/12	58869,24	634,4 kW	912,94 kW	0,69	1,44
set/12	49018,94	626,0 kW	760,18 kW	0,82	1,21
out/12	51774,10	685,0 kW	802,91 kW	0,85	1,17
nov/12	55708,78	674,0 kW	863,93 kW	0,78	1,28
dez/12	55286,88	685,0 kW	857,39 kW	0,80	1,25
jan/13	60392,18	699,0 kW	936,56 kW	0,75	1,34
fev/13	60905,13	727,0 kW	944,51 kW	0,77	1,30
Média	49684,94	634,42 kW	770,51 kW	0,84	1,21

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Como exibido na Tabela 7 o inverso do parâmetro ALFA, calculado a partir da equação 1, possui o valor de 1,21 kWth/kWe e, de acordo com a Tabela 2, pode-se definir um motor de combustão interna ou uma turbina a gás como tecnologias para compor o sistema de cogeração que atenda as demandas energéticas da indústria de rodas de liga leve.

4.2 Sistemas de cogeração propostos

De acordo com o ALFA, pode-se definir o motor de combustão interna ou uma turbina a gás para compor o sistema de cogeração. Nos sistemas propostos, a cogeração se caracteriza por completo através do aproveitamento do calor retido nos gases de exaustão do equipamento dentro dos trocadores de calor por contato direto.

4.2.1 Sistema de cogeração com motor de combustão interna

Na Figura 17 pode ser observado o layout do sistema de cogeração por combustão interna. A proposta se baseia em um sistema que emprega um motor de combustão interna acoplado a um gerador fornecendo energia elétrica à planta industrial. A cogeração se distingue

por completo através da aplicação do calor retido nos gases de exaustão do motor, sendo este transferido às placas de alumínio, no trocador de calor por contato direto. Essas placas de alumínio posteriormente serão derretidas para fabricação das peças.

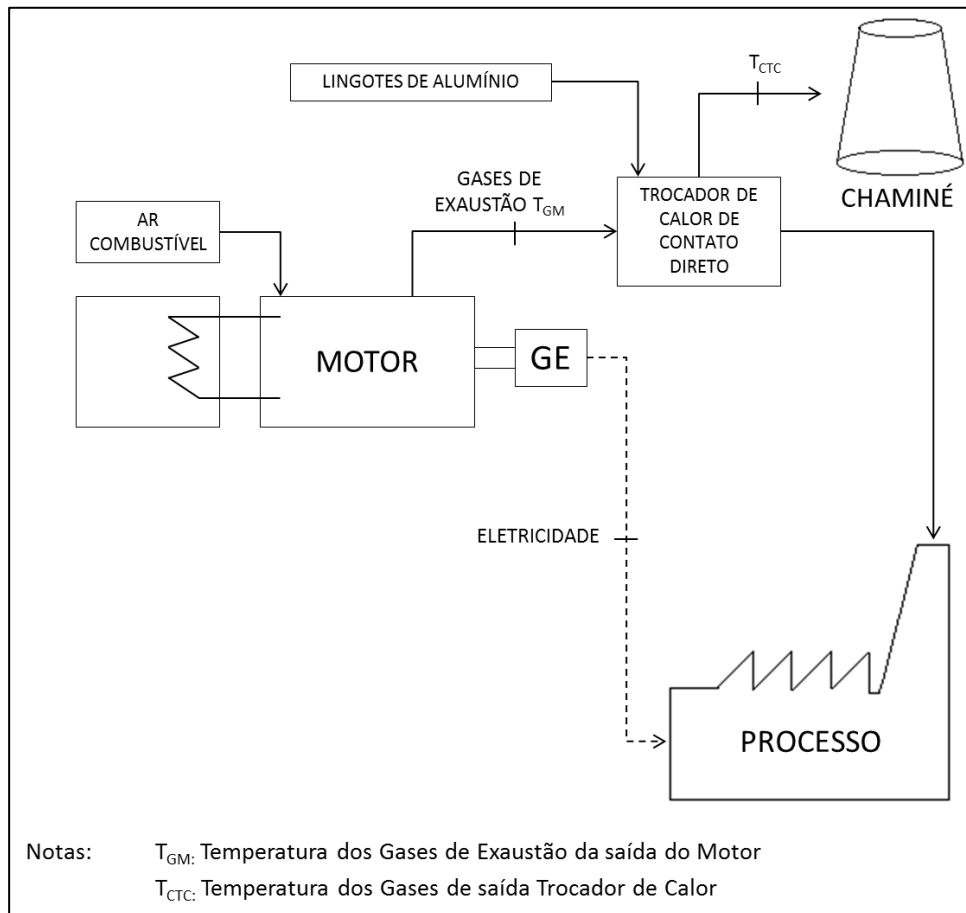


Figura 17: Sistema de cogeração proposto com motor de combustão interna.
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

O sistema pode ser classificado como *topping*, pois ocorre primeiramente a geração de energia elétrica e posteriormente de energia térmica, assim como conceituado por Belisário (2012). Adotou-se a paridade elétrica como a estratégia de operação para estes sistemas de cogeração, tendo em vista que a demanda elétrica será suprida pelo motor e os gases de exaustão do motor suprirão parte da necessidade térmica.

4.2.1.1 Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração

Diante da demanda elétrica de 635 kW, foram escolhidos três motogeradores de diferentes empresas para emprego na central de cogeração. A Figura 18 apresenta os modelos selecionados e a

Como pode ser visto na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, os MCI são alimentados com óleo Diesel, cujo PCI adotado para cálculos foi de 42.780 kJ/kg. Ademais, os geradores produzem energia elétrica na frequência de 60 Hz, compatível com a rede elétrica brasileira. Empregaram-se as equações 14 a 23 para a montagem e obtenção dos dados exibidos na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** que não estavam disponíveis nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 8 exhibe os parâmetros e especificações principais destas máquinas.

<p style="text-align: center;">CAT[®]</p> <hr/> <p>STANDBY 750 ekW 938 kVA 60Hz 1800rpm 480Volts</p>	<p style="text-align: center;">DOOSAN</p> <p style="text-align: center;">DP222LA</p>	<p style="text-align: center;">KOHLER</p> <p style="text-align: center;">KX800UC2</p>
		

Figura 18: Modelos de Motogeradores selecionados.
Fonte: Caterpillar Inc (2017a); Doosan (2017); Kohler (2017).

Como pode ser visto na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, os MCI são alimentados com óleo Diesel, cujo PCI adotado para cálculos foi de 42.780 kJ/kg. Ademais, os geradores produzem energia elétrica na frequência de 60 Hz, compatível com a rede elétrica brasileira. Empregaram-se as equações 14 a 23 para a montagem e obtenção dos dados exibidos na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** que não estavam disponíveis nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 8: Especificações dos motogeradores selecionados.

ESPECIFICAÇÕES GERADORES				
MODELO		Caterpillar C27	Doosan	KX800UC2
Potência gerada de base	kWe	750	670	800
Frequência	Hz	60	60	60
Velocidade	RPM	1800	1800	1800
Parâmetros dos motores				
Potência máxima gerada	kW	937,5	911	1203
Combustível	-	Diesel	Diesel	Diesel
PCI do combustível	kJ/kg	42780	42780	42780
Fluxo mássico de combustível	kg/s	0,048	0,051	0,046
Energia fornecida pelo combustível	kW	2048,7	2176,0	1989,2
Diâmetro do cilindro x Curso	mm x mm	137,2 x 152,40	128 x 142	130 x 150
Número de cilindros	-	12	12	12
Cilindrada	L	27,03	21,93	23,89
Taxa de compressão	-	16,5:1	15,1:1	16,0:1
Eficiência Elétrica	%	37%	31%	40%
Eficiência Térmica	%	36%	21%	32%
Temperatura dos gases de escape	°C	868,5	715,8	850,0
Fluxo mássico dos gases de escape	kg/s	0,97	0,79	0,86
Calor rejeitado	kW	737,7	450,5	631,9

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Em meio aos motogeradores, determinaram-se três cenários característicos para o sistema de cogeração. Ficando assim nomeado como “Motor 1” o cenário no qual emprega-se o equipamento Caterpillar C27 que gera 750 kWe de potência elétrica, sendo capaz de suprir a demanda elétrica total (eletricidade para a planta industrial) da empresa, conforme valores apresentados na Tabela 7 e 737,7kW de potência térmica. Nota-se que este modelo possui a maior taxa de compressão e maiores valores para a diâmetro do cilindro e curso, acarretando num valor relativamente maior para a potência térmica, se comparado com o equipamento 3.

O cenário 2, denominado “Motor 2”, contempla a utilização do modelo Doosan Infracore Generator Engine DP222LA gerando potência elétrica total de 670kW e 450,5 kW de potência térmica. Este equipamento possui valores para a taxa de compressão e dimensão dos cilindros relativamente menores das dos modelos 1e 3, contudo possui o mesmo número de

cilindros, acarretando numa vazão de gases de exaustão, potência elétrica e potência térmica inferiores aos equipamentos 1 e 3.

E o cenário 3, denominado “Motor 3”, que utiliza o motor Kohler KX800UC2, gerando potência elétrica total de 800kW e 631,9kW de potência térmica. Caracterizado por ter dimensões de diâmetro do cilindro e curso bem próximos ao “Motor 1” e ter o mesmo número de cilindros, 12. Como possui menor taxa de compressão, seu rendimento térmico é inferior ao motor 1, acarretando numa potência térmica inferior.

4.2.1.2 Resumo da análise energética do sistema de cogeração

Mediante a equação 25, foi obtida a eficiência global de cogeração para cada cenário, utilizando PCI de 42.780 kJ/kg para o combustível adotado conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros de saída dos cenários do sistema proposto.

Parâmetros	Caterpillar		Doosan		Kohler	
Potência do Motor [kW]	750,00	36,6%	670,00	41,0%	800,00	40,2%
Calor rejeitado (gases de exaustão) [kW]	737,69	36,0%	450,50	27,6%	631,89	31,8%
Calor rejeitado (água refrig.) [kW]	324,11	15,8%	249,81	15,3%	304,34	15,3%
Calor rejeitado (óleo lubrificante) [kW]	112,68	5,5%	114,29	7,0%	139,24	7,0%
Radiação e outras perdas [kW]	124,25	6,1%	148,13	9,1%	113,69	5,7%
Total	2048,74	100%	1.632,73	100%	1989,16	100%
Temperatura dos gases de escape [°C]	868,46		715,80		849,99	
Fluxo mássico dos gases de escape [kg/s]	0,97		0,79		0,86	
Eficiência de cogeração	73%		69%		72%	

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

De acordo com a Tabela 9, pode-se afirmar que o sistema de cogeração proposto através do reaproveitamento dos gases de exaustão do MCI é viável tecnicamente para todos os cenários, pois apresentam eficiência global de cogeração superior a 69%. Observa-se que o cenário “Motor 1” é o que apresenta maior eficiência global de cogeração, 73%, atende a demanda elétrica e atende a 96% da demanda térmica da indústria em questão, em contrapartida os motores 2 e 3 atendem eletricamente a indústria, mas atendem, respectivamente, 59% e 82%, a demanda térmica.

Pode-se observar que o “Motor 1” possui a maior eficiência térmica (37%) dentre os motores. Percebe-se que o fato de esse motor possuir maior cilindrada, conseqüentemente tem maior fluxo mássico de gases de exaustão, este gasta maior parcela da energia para aquecer do

que para produzir energia elétrica. Em contrapartida o motor 3 possui a maior eficiência elétrica (40%).

4.2.2 Sistema de cogeração com turbina a gás

Através da caracterização das necessidades energéticas da indústria obteve-se o inverso do parâmetro ALFA, cujo valor máximo é de 1,22 kWth/kWe e que permite ainda a configuração de uma central de cogeração aplicando uma turbina a gás, sendo este formado com o intuito comparativo com o sistema proposto para a indústria de rodas de liga leve.

Na Figura 19 a proposta de cogeração se baseia em um sistema que emprega uma turbina a gás a um gerador que fornece energia elétrica a planta industrial.

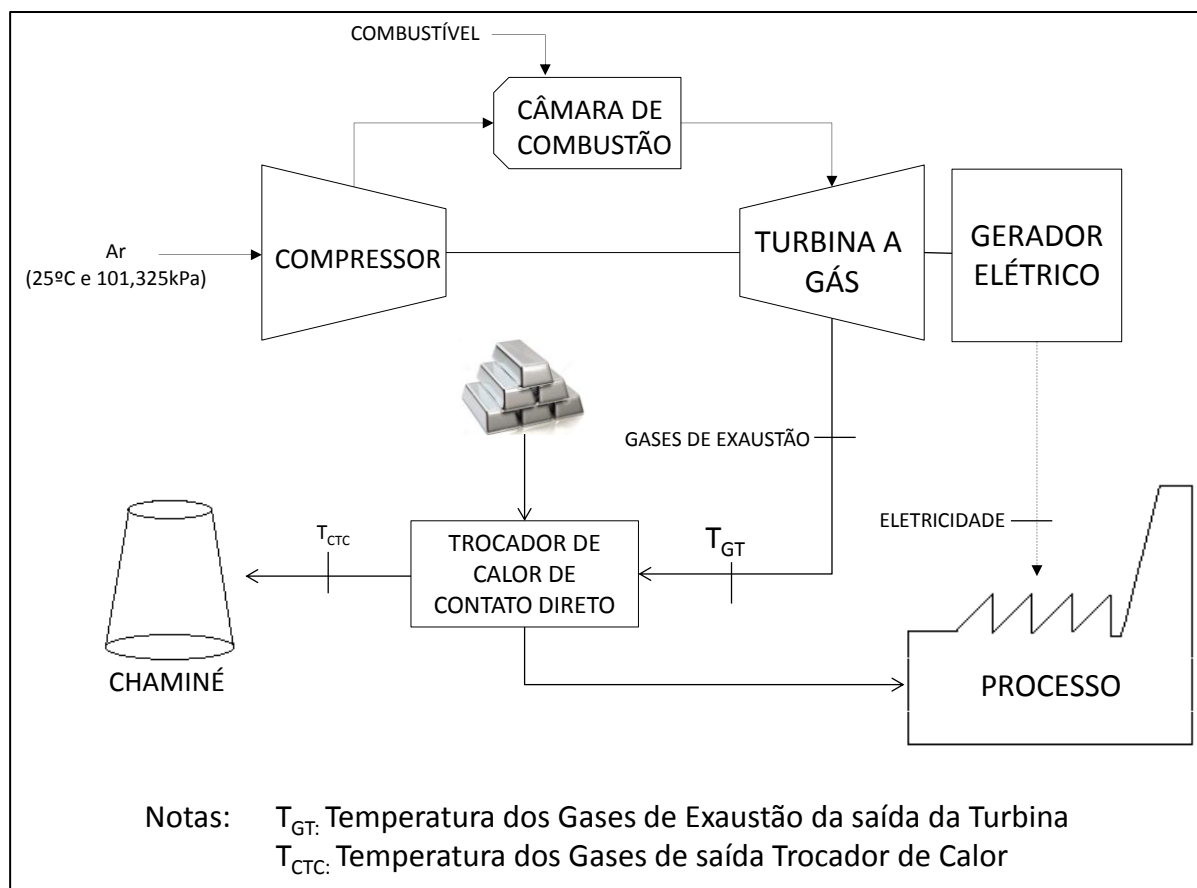


Figura 19: Sistema de cogeração proposto com turbina a gás.
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

No sistema de cogeração descrito na Figura 19, assim como no sistema de cogeração anterior se classificam como sendo de um sistema *topping*, pois ocorre primeiramente a geração de energia eletromecânica e posteriormente de energia térmica, assim como conceituado por Belisario (2012). Adotou-se a paridade térmica como a estratégia de operação para estes sistemas de cogeração.

O modo de funcionamento da central de cogeração é da seguinte maneira: a turbina supre a demanda elétrica total da planta e os gases de exaustão que saem da turbina é admitido no trocador de calor por contato direto, aquecendo as placas de alumínio, suprindo assim, parte da demanda térmica, da mesma forma que o sistema proposto anteriormente. A caracterização da cogeração é representada quando ocorre o aproveitamento dos gases de exaustão da turbina para atendimento da demanda térmica de acordo com as especificações necessárias para o processo produtivo.

4.2.2.1 Os equipamentos selecionados e os cenários envolvidos no sistema de cogeração comparativo

Diante da demanda elétrica de 635 kW escolhendo três tipos de turbina a gás de alta pressão para emprego na central de cogeração. A Figura 20 apresenta os modelos selecionados e a Tabela 10 exhibe os parâmetros e especificações principais destas máquinas.

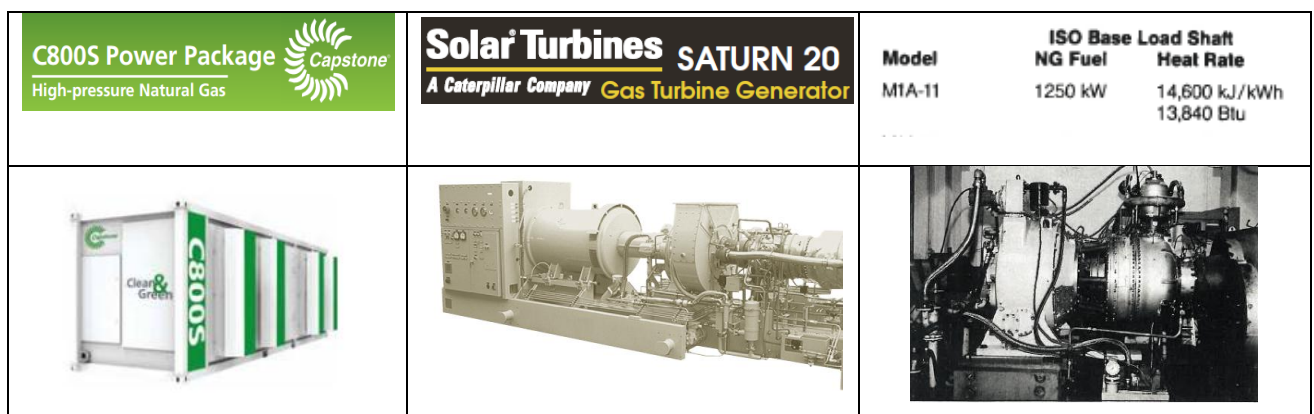


Figura 20: Turbinas a gás selecionadas.

Fonte: Capstone, (2017); Caterpillar (2017b); Kawasaki (2017).

Para obtenção dos valores das potências de cada turbina, foi-se necessário à análise dos gráficos e tabelas de cada equipamento. Adotou-se 30°C a temperatura de entrada no compressor da turbina, referente à temperatura ambiente. Como pode ser analisado na Figura 21, Figura 22 e Figura 23, encontra-se os valores de Potência de Saída e Taxa de Calor para a temperatura requerida.

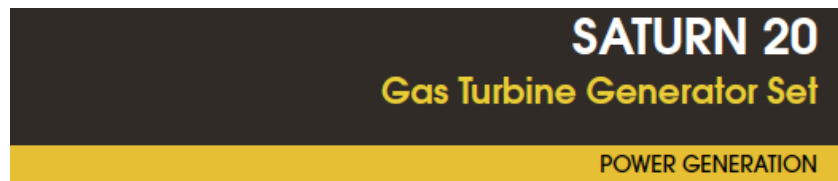


Table 7-2. Nominal Net Power Output and Efficiency versus Ambient Temperature (Cont)

Ambient Temp (°F)	Net Power per module (kW)	Net Efficiency (%)	Exhaust Temp (°F)	Exhaust Mass Flow Rate per module (lbm/s)	Exhaust Energy Rate per module (kW) (LHV)	Fuel Flow Energy Rate per module (Btu/hr) (LHV)	Net Heat Rate (Btu/kWh) (LHV)
81	192.1	31.9	566.0	2.90	398.2	2,053,386	10,692
82	191.0	31.9	566.8	2.89	397.4	2,045,439	10,709
83	190.0	31.8	567.7	2.89	396.6	2,037,557	10,727
84	188.9	31.8	568.5	2.88	395.7	2,029,736	10,744
85	187.9	31.7	569.4	2.88	394.9	2,021,975	10,762
86	186.9	31.7	570.2	2.87	394.1	2,014,237	10,779
87	185.8	31.6	571.1	2.87	393.3	2,006,482	10,797
88	184.8	31.6	571.9	2.86	392.5	1,998,785	10,815
89	183.8	31.5	572.7	2.86	391.6	1,991,144	10,832
90	182.8	31.5	573.5	2.85	390.8	1,983,558	10,850
91	181.8	31.4	574.3	2.85	389.9	1,976,025	10,868
92	180.8	31.4	575.1	2.84	389.0	1,968,545	10,886
93	179.8	31.3	575.8	2.84	388.1	1,960,963	10,904
94	178.8	31.2	576.6	2.83	387.1	1,953,318	10,922

Figura 21: Análise Heat Rate e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Capstone para 86°F (30°C).

Fonte: Capstone, 2017.



Available Power

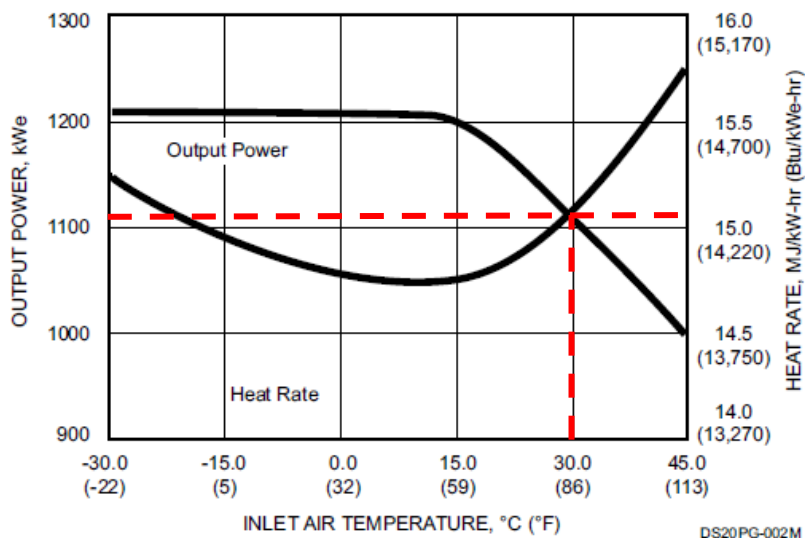


Figura 22: Análise Heat Rate e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Caterpillar.

Fonte: Caterpillar, 2017b.

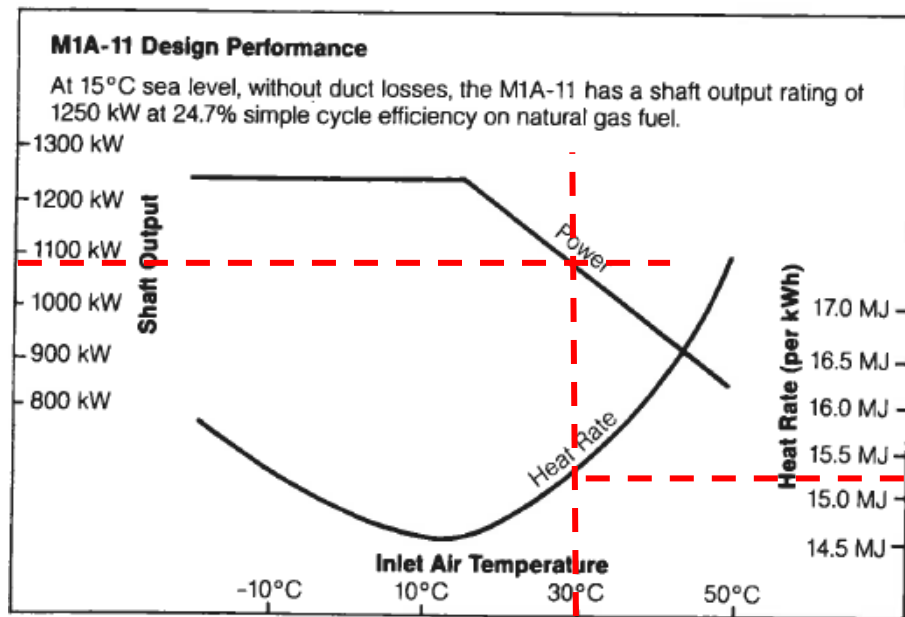


Figura 23: Análise *Heat Rate* e Potência gerada em função da temperatura de entrada da turbina Kawasaki.

Fonte: Kawasaki, 2017.

As turbinas são alimentadas com gás natural, cujo PCI adotado para cálculos foi de 47.000 kJ/kg. Ademais, os geradores produzem energia elétrica na frequência de 60 Hz, compatível com a rede elétrica brasileira. Empregaram-se as equações 10 a 13 para a montagem e obtenção dos dados exibidos que não estavam disponíveis nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 10: Especificações das turbinas selecionadas.

MODELO		C800S Power Package	Saturn 20	Kawasaki M1A – 11
Potência máxima gerada	kWe	747,6	1110	1050
Frequência	Hz	60	60	60
Velocidade	RPM	1800	1800	1800
Dimensão	Mm	3000 x 9100 x 2900	1727 x 5982 x 2134	5300 x 16500 x 23500
Combustível	-	gás natural	gás natural	gás natural
Taxa de Calor	kJ/kWh	11372,4	15100,0	15500,0
PCI do combustível	kJ/kg	47000	47000	47000
Fluxo mássico de combustível	kg/s	0,050	0,099	0,096
Energia fornecida pelo combustível	kW	2361,68	4655,83	4520,83
Razão combustível-ar	-	0,010	0,015	0,013
Fluxo mássico de ar	kg/s	5,157	6,440	7,304
Fluxo mássico de gases de exaustão	kg/s	5,21	6,54	7,400
Temperatura dos gases de escape	°C	300	505	470
Potência Térmica (gases de exaustão)	kW	394,1	1131,4	1116
Eficiência Elétrica	-	31,7%	23,8%	23,2%
Eficiência Térmica	-	16,7%	24,3%	24,7%
Eficiência de Cogeração	-	48%	48%	48%

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Em meio às turbinas, determinaram-se três cenários característicos para o sistema de cogeração. Ficando assim nomeado como “Turbina 1” o cenário no qual emprega-se o equipamento C800S Power Package, da marca Capstone, que gera 747,6 kWe de potência elétrica, sendo capaz de suprir a demanda elétrica total (eletricidade para a planta industrial) da empresa. Além de gerar 394,1 kW de potência térmica, acarretando em 16,7% de eficiência térmica. Possui as menores taxas de fluxo mássico de ar, fluxo mássico de gases de exaustão e a menor taxa de razão combustível ar, esse cenário possui a maior eficiência elétrica dos 3 equipamentos 31,7%.

O cenário 2, denominado “Turbina 2”, contempla a utilização do modelo Saturn 20, da marca Caterpillar, gerando potência elétrica total de 1110 kW, valor consideravelmente superior ao necessário, e 1131,3 kW de potencia térmica. Caracterizada por ser a turbina que

tem maior potência elétrica devido ao seu maior Heat Rate e fluxo mássico de combustível, acarretando assim numa elevada potencia térmica.

E o cenário 3, denominado “Turbina 3”, utiliza o equipamento Kawasaki M1A-11, gerando potência elétrica total de 1050kW, valor consideravelmente superior ao necessário, e 1116kW de potência térmica. Se comparado com a turbina 2, possui valores muito próximos, contudo produz uma quantidade inferior de potência elétrica.

4.3 Resumo da análise energética do sistema de cogeração comparativo

A Tabela 11 apresenta os parâmetros necessários para a análise da eficiência de cogeração, bem como a vazão mássica de combustível, a energia fornecida pelo combustível, a vazão mássica dos gases de escape e a eficiência elétrica e térmica de cada equipamento.

Tabela 11: Parâmetros para análise da Potência de Cogeração.

Parâmetros	Motores			Turbinas		
	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3
Potência do Motor [kW]	750	670	800	748	1110	1050
Vazão mássica de combustível [kg/s]	0,048	0,051	0,046	0,050	0,099	0,096
Energia fornecida pelo combustível	35,9	34,1	37,2	37,57	109,96	101,00
Calor rejeitado (gases de exaustão) [kW]	737,69	450,50	631,89	394,1	1131,4	1116
Temperatura dos gases de escape [°C]	868,46	715,80	849,99	300	505	470
Vazão mássica dos gases de escape [kg/s]	0,97	0,79	0,86	5,21	6,54	7,400
Eficiência Elétrica	37%	31%	40%	31,7%	23,8%	23,2%
Eficiência Térmica	36%	21%	32%	16,7%	24,3%	24,7%
Eficiência de cogeração	73%	69%	72%	48%	48%	48%

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

A partir dos dados da Tabela 11, nota-se que todos os motores apresentam eficiência global de cogeração satisfatória, com valores próximos a 70%. Contudo todas as turbinas apresentam eficiência global de cogeração equivalente a 48%.

Em todos os cenários é suprida a demanda elétrica da empresa e em alguns casos ocorre geração de excedentes de energia, como pode ser analisado na Figura 24. O cenário que mais produz excedentes é o “Turbina 2” e o que mais se aproxima da demanda necessária é o cenário “Motor 2”.

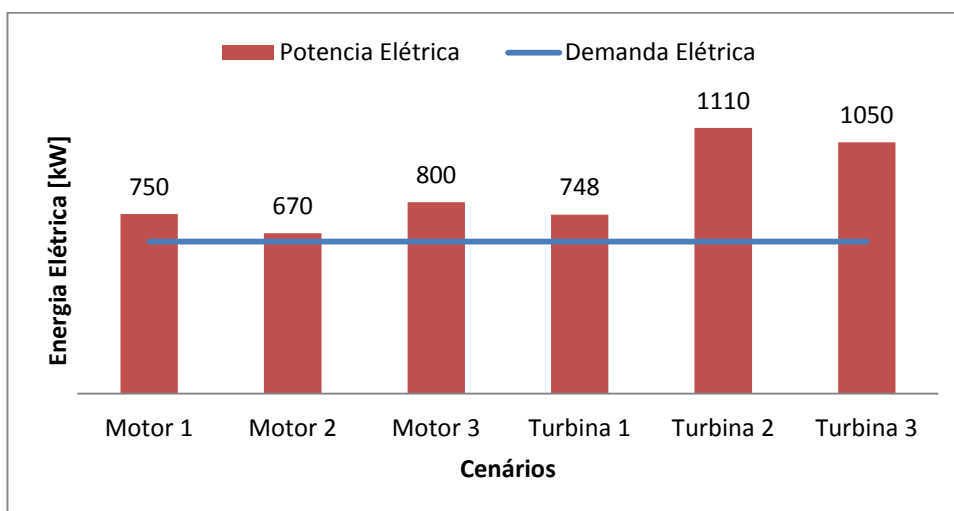


Figura 24: Atendimento a Demanda elétrica de cada equipamento.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Como analisado na Figura 25, a demanda térmica é parcialmente suprida pelos motores, tendo destaque o cenário “Motor 1” no qual possui maior potência térmica. Dentre as turbinas há grande quantidade de excedente nos cenários “Turbina 2” e “Turbina 3”, enquanto o cenário “Turbina 1” não atende a demanda térmica necessária.

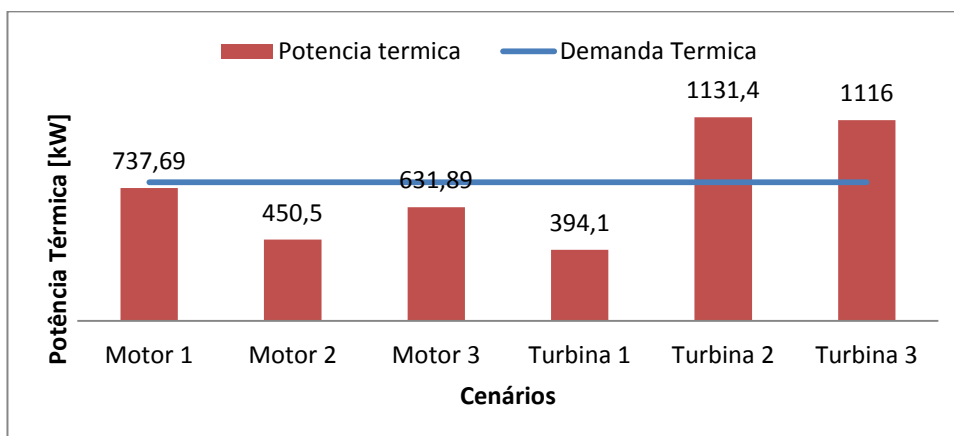


Figura 25: Atendimento a Demanda térmica de cada equipamento.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

4.4 Considerações finais

Pela Figura 26, observa-se que o sistema de cogeração empregando motor de combustão interna apresentou eficiência global superior ao sistema empregando turbina a gás. Salienta-se que apesar da menor eficiência, a central de cogeração empregando turbinas, atende todas as necessidades energéticas de calor e eletricidade da unidade de processo. Contudo, diferentemente do sistema utilizando MCI, não possui eficiência de cogeração elevada.

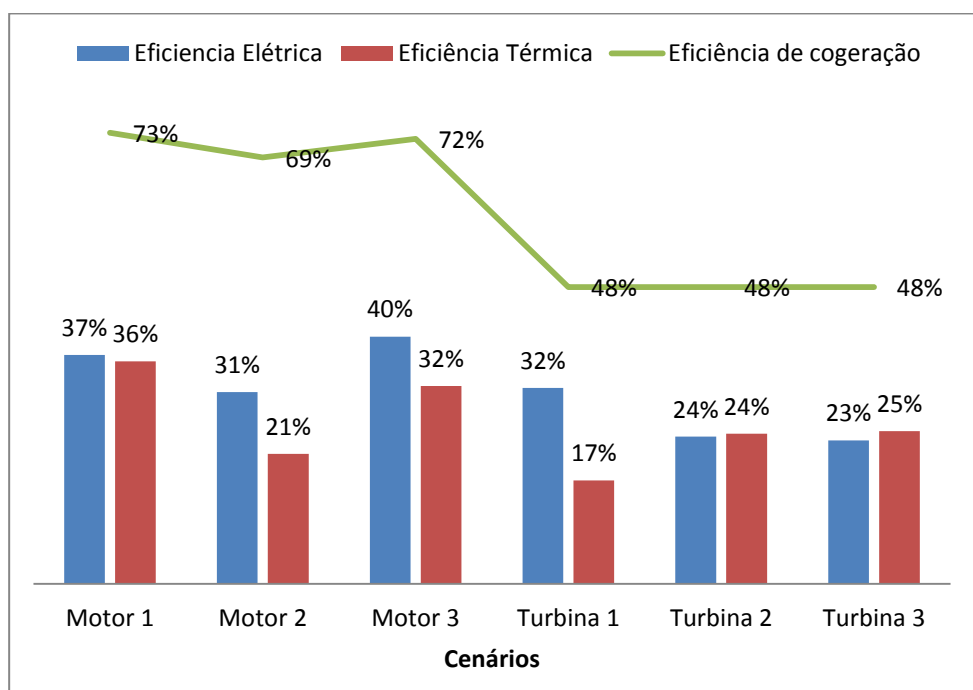


Figura 26: Potências térmica, elétrica e de cogeração de cada equipamento.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Sendo assim, a análise dos seis cenários envolvidos na proposta deste sistema de cogeração permite afirmar que as demandas energéticas são perfeitamente atendidas, além de ser gerado um excedente de eletricidade. Fica evidente, também, que a utilização de turbinas a gás apresenta maior potência elétrica e térmica necessária, conforme Figura 24, contudo possui baixa eficiência de cogeração.

Verifica-se que a eficiência global de cogeração possui maior valor nos cenários, “Motor 1”, no qual apresenta 73% de eficiência de cogeração, sendo 37% de eficiência elétrica e 36% de eficiência térmica e o cenário “Motor 3”, no qual possui 72% de eficiência de cogeração, sendo 40% de eficiência elétrica e 32% de eficiência térmica. Observa-se que o

cenário “Motor 1” atende totalmente a demanda elétrica e 96% da demanda térmica, enquanto o cenário “Motor 3” também atende totalmente a demanda elétrica, contudo atende somente a 86% da demanda térmica da indústria.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo finaliza o presente trabalho apresentando as conclusões obtidas através do estudo realizado e recomendações para novas pesquisas.

5.1 Conclusões

Conforme o cenário previsto para o setor automobilístico, a projeção de demanda energética para a indústria de rodas de liga leve será mantida, visto que foi proposto para manter o sistema de cogeração com motor de combustão interna de acordo com as necessidades futuras de calor e eletricidade da indústria em estudo.

O inverso do parâmetro ALFA que caracteriza a indústria de rodas de liga leve foi de 1,22 kWh/kWe e, de acordo com os dados fornecidos pela Devki Energy Consultancy (2006), sugere a implantação de um sistema de cogeração empregando um motor de combustão interna ou uma turbina a gás.

Dessa forma, a central de cogeração proposta foi dimensionada para operar em paridade elétrica e em configuração *topping*. Houve o reaproveitamento dos gases exauridos do motor de combustão interna ou turbina a gás para o suprimento da demanda térmica da indústria. As configurações que utilizaram o MCI apresentaram resultados satisfatórios em todos os cenários estudados, caracterizando-os como tecnicamente viáveis, visto que além de atender todas as demandas energéticas, apresenta eficiência global aproximada de 70%. Sendo assim, a análise dos três cenários envolvidos na proposta deste sistema remeteu a escolha do Cenário “Motor 1” que emprega um motogerador, modelo Caterpillar C27, por apresentar maior eficiência global de cogeração, ou seja, 73% e atende a 96% da demanda térmica da planta.

Para o sistema comparativo, dentre os cenários analisados, o cenário “Motor 3” apresenta eficiência de 72%. Entretanto, só atende a 86% da demanda térmica, sendo esse o critério pelo qual o Motor 1 é a melhor opção.

Enfatiza-se que como neste trabalho não há uma análise econômica dos equipamentos, as escolhas dos cenários estudados estão relacionadas às potências energéticas produzidas e consumidas pelos equipamentos, ou seja, a viabilidade técnica.

Finalizando, o sistema de cogeração proposto utilizando motor de combustão interna pode ser implantado pela empresa, pois atende as demandas energéticas do processo produtivo e apresenta eficiência global de cogeração dentro dos valores estabelecidos por outros estudos e afirmados por Devki Energy Consultancy (2006) e Balestieri (2002). Ressalta-se que para uma proposição completa e concisa de um sistema de cogeração, o investimento inicial, o consumo e preço dos combustíveis empregados nos equipamentos devem ser estudados. O tempo de retorno financeiro é outro parâmetro decisivo para a escolha do adequado projeto, assim como o preço, manutenção e vida útil dos equipamentos. Neste contexto, são sugeridas estas análises em estudos futuros como descrito no item a seguir.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para novos trabalhos na área pode-se citar:

- Análise de viabilidade econômica da central de cogeração proposta;
- Análise exérgica das máquinas térmicas envolvidas no sistema de cogeração;
- Proposições de outras unidades de cogeração envolvendo outros ciclos térmicos, como ciclo de absorção para refrigeração de salas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Montadoras apostam em rodas forjadas de alumínio para veículos de passeio** Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluauto/ed24/rodas.htm>>. Acesso em: 28 jan. 2016.

ALCOA - ALUMINUM COMPANY OF AMÉRICA. **Rodas.** Disponível em: <http://www.alcoa.com/brasil/pt/info_page/rodas.asp> Acesso em: 28 jan. 2016.

ALUJET - ALUJET INDUSTRIAL LTDA E COMERCIAL. **Fabricação de rodas de liga leve.** Disponível em: < <http://www.alujet.com.br/index.php/pt-br/>>. Acesso em: 28 jan. 2016.

ALYRIO, R.D. **Metodologia Científica.** PPGEN: UFRRJ, 2008.

ANDREOS, R. **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de Pequenas Centrais de Cogeração a Gás Natural no Setor Terciário do Estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Energia), Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras Tarifárias.** Disponível em: <www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758>. Acesso em: 26 abr. 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006.** Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Eficiência Energética** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656831/14942216/Revista+2+PEE/669f4566-c2c2-4681-ba4d-ffd36e285eb7>>. Acessado em 26 de abril de 2015.

ARTEAGA, J. A. F. **Análise Energética e Exergética de um Sistema de Cogeração com Motores de Combustão Interna**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2010.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2002, 279p. Garrido, Santiago García & Fraile, Diego. “Cogeneración: Diseño, Operación Y Mantenimiento de Plantas”, Ediciones Díaz de Santos, Espanha, 2002.

BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de Centrais de Cogeração: Uma Abordagem Multiobjetiva**. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica UNICAMP. Campinas, SP, 1994.

BARREDA, D. C. **Avaliação termoeconômica da usina Vale do Rosário**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1999.

BASTOS, J. B. V. **Avaliação de Mecanismos de Incentivo à Cogeração de Energia a partir do Bagaço da Cana de Açúcar em uma Planta Química Brasileira de Soda-Cloro**. Dissertação (Mestrado), Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, 2011.

BELISARIO, I. C. **Análise Termoeconômica de uma Central de Cogeração de uma Indústria Siderúrgica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 2012.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos aplicada: Engenharia**. 2ª ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall 2008.

BUHLER, **Fundição Sob Pressão Tradicional De Alumínio**. Disponível em: <<http://www.buhlergroup.com/southamerica/pt/tecnologias-de-processo/fundicao-sob-pressao/fundicao-sob-pressao-tradicional-de-aluminio.htm#.Vto1DX0rK1s>> Acesso em 04 de mar de 2016.

CAPSTONE – Catálogo de equipamento. Disponível em: <<http://www.e-finity.com/products/brochures/C800S%20Digester%20Gas.pdf>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017.

CARVALHO, M. B. **Análise de um sistema de cogeração empregando turbina a gás aplicado a uma indústria de Malte**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2004.

CARVALHO, M. O. M. (2004). **Avaliação econômica de projetos de energia, análise custo benefício**. In: X Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro: X CBE. (v. III, p. 1431-1442). Szklo, A., Tolmasquim, M. “Strategic cogeneration – fresh horizons for the development of cogeneration in Brazil”, Applied Energy. v. 69, p. 257-268, 2001.

CASTRO, R. **Introdução à Cogeração**. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2a Ed. 2009. Disponível em: <www.marioloureiro.net/tecnica/co-trigeracao/Cogeracao_ed2p0.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2015.

CATERPILLAR - Catálogo de equipamento. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10001715>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017.

CATERPILLAR - Catálogo de equipamento. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10550179>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Kátia Aparecida Roque. 5.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

CHP CLUB. **The manager’s guide to custom-built combined heat and Power systems**. United Kingdom, 2002.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indicador de Custos Industriais**. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/cni_estatistica_2/>

2015/09/10/34/IndicadordeCustosIndustriais_Abril-Junho2015.pdf>. Acesso em 27 de novembro de 2015b.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Perfil da Indústria**. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/cni_estatistica_2/2015/02/11/166/Perfil_da_Industria_nos_Estados_Fevereiro2015.pdf/>. Acesso em: 10 nov. 2015a.

COGEN - ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. **Aplicações**. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/cog_aplica.asp>. Acesso em: 17 nov. 2015.

COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE Energia. **Manual de Eficiência energética** Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/\\$FILE/manual_eficiencia_energ.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/$FILE/manual_eficiencia_energ.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2015.

COSTA, Y. J. R. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. 2007. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

CUNHA, R. T. A.; SANTIAGO, P. F. **Análise de viabilidade econômica da instalação de uma planta de cogeração no Hospital Clementino Fraga Filho situado na UFRJ, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro**. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Mecânica. UFRJ, 290 f., 2002.

DEVKI ENERGY CONSULTANCY PVT. LTD., **Best Practice Manual of Cogeneration**. 2006. Disponível em: <<http://www.energymanagertraining.com/CodesandManualsCD-5Dec%2006/BEST%20PRACTICE%20MANUAL-COGENERATION.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

DOOSAN Disponível em: <<http://www.parsian-diesel.com/Uploads/Data/engine%20Gdrive/doosan/DP222LA.pdf> 2017>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2014**. Ministério de Minas e Energia - MME. Rio de Janeiro: EPE, 2014 Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2014**. Ministério de Minas e Energia - MME. Rio de Janeiro: EPE, 2014 Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2015.

FENABRAVE Relatório Semestral da Distribuição de Veículos Automotores do Brasil Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwipybny0uzSAhWBGJAKHRL0BsIQFggiMAE&url=http%3A%2F%2Fwww3.fenabreve.org.br%3A8082%2Fplus%2Fmodulos%2Flistas%2F%3Ftac%3Ddownload%26file%3D%2Flistas%2Fplusfiles%2Fsemestral_2016.pdf&usg=AFQjCNEIIRqu6n7_Cc_Yb9fVOnBDZBh9SA&sig2=3Mm8mMCFKtH66wGyicXTNw> Acessado em 26 de julho de 2016

FERREIRA, J.M.G.C., **Tecnologia da Fundação**, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002.

FORGE. **Termoeletricidade de Seebeck aplicada no forjamento a quente** Disponível em: <http://www.revistaforge.com.br/artigo-tecnico/termoeletricidade-de-seebeck-aplicada-no-forjamento-a-quente/2913>. Acesso em 18 de novembro de 2015.

GARRIDO, Santiago García & Fraile, Diego. **“Gogeneración: Diseño, Operación Y Mantenimiento de Plantas”**, Ediciones Díaz de Santos, Espanha, 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GRESSLER, Lori Alice. **Introdução à pesquisa**. Edições Loyola, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Bioenergy Project Development & Biomass Suply. Good Practice Guidelines.** Disponível em: <<http://www.iea.org/Textbase/about/copyrigh.asp>>. Acesso em: 14 jan. 2016

KAWASAKI - Catálogo de equipamento. Disponível em: <<http://intpower.com/wp-content/uploads/2012/10/rep-GTW-feb89-kawasaki.pdf>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017.

KOHLER Catálogo de equipamento. Disponível em: <<http://www.kohlerpower.com.sg/onlinecatalog/pdf/KX800UC2.pdf>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017.

LORA E. E. S.; NASCIMENTO M. A. R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação.** 1ª ed. Rio de Janeiro, 2004.

MORAN M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia.** 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 800 p.

OFICINA DAS RODAS - **História das rodas de liga-leve.** Disponível em: <<http://www.oficinasrodas.com.br/articles/historia-liga-leve.html>>. Acesso em 20 de março de 2016.

PETROBRAS Gás Liquefeito do Petróleo. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos/gas-liquefeito-de-petroleo-glp/>> Acessado em 27 de setembro de 2014.

RODRIGUES, M. L. M. **Estudo Técnico-Econômico Da Implantação Da Cogeração Em Pequena Escala A Biomassa Em Uma Indústria.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais, 188 páginas. 2009.

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SILVEIRA, J. S. **Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudos de casos para o Setor Terciário.** 1994. 193f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

SILVEIRA, J. S. **Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudos de casos para o Setor Terciário.** 1994. 193f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

SILVEIRA, J. L. Cogeração. In: **Simpósio De Energias Alternativas, II.**, Anais..., Guaratinguetá, out. 2009.

SOARES, J.B., Szklo A., Tolmasquim M. “**Alternative depreciation policies for promoting combined heat and power (CHP) development in Brazil**”, Energy. v. 31, p.1151- 1166, 2015.

Szklo, A., Tolmasquim, M. “**Strategic cogeneration – fresh horizons for the development of cogeneration in Brazil**”, Applied Energy. v. 69, p. 257-268, 2001.

THURSTON, R. H. **A History of the Growth of the Steam-Engine.** New York: D. Appleton and Co., 1878.

TORRES, J., **Manual Prático de Fundição**, São Paulo, Hemus Livraria Ed. Ltda, 1975.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 3.ed. Rio de Janeiro: Atlas, 1997.

VOLCANO, **Conheça o processo de fabricação das rodas de liga leve da Volcano Wheels.** Disponível em: < http://www.volcanowheels.com/manual_tecnico >. Acesso em 04 de marco de 2016.

WALTER, A.C.S. **Cogeração: Viabilidade e Perspectivas da Cogeração e da Geração Termoeétrica junto ao setor sucro-alcooleiro.** Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica / UNICAMP, 1994. Campinas, SP, Brasil

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.