



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO –  
UFOP  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE  
E AUTOMAÇÃO**



**GUILHERME DE NARDE**

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO  
A UM SUPERMERCADO LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE  
ARACRUZ-ES**

**OURO PRETO - MG  
2017**

**GUILHERME DE NARDE**  
**guilhermedenardi@hotmail.com**

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO  
A UM SUPERMERCADO LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE  
ARACRUZ-ES**

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

**Professora orientadora:** Dra. Elisângela Martins Leal

**OURO PRETO – MG**  
**2017**

N223a

Narde, Guilherme.

Análise técnica de um sistema de cogeração aplicado a um supermercado localizado no município de Aracruz - ES [manuscrito] / Guilherme Narde. - 2017.

88f.: 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 elétrica e calor - Cogeração. 2. Supermercados. 3. Sistemas de energia elétrica - Desempenho. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto: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 4º dia do mês de abril do ano de dois mil e dezessete às 14 horas, no Auditório da Fundação Gorceix, localizada na Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Guilherme de Narde**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva, Profa. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Análise Técnica de um Sistema de Cogeração Aplicado a um Supermercado localizado no município de Aracruz-ES**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado com a nota/conceito 8,7.

Ouro Preto, 04 de abril de 2017.

Profª DSc. Elisângela Martins Leal  
**Professora Orientadora**

Prof. DSc. Washington Luis Vieira da Silva  
**Professor Avaliador**

Profa. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos  
**Professora Avaliadora**

Guilherme de Narde  
**Aluno**

Dedico este trabalho aos meus pais e professores como símbolo do aprendizado e forma de reconhecimento pelos esforços e ensinamentos transmitidos.

## **AGRADECIMENTO**

À minha orientadora Elisângela, por ter compartilhado seu conhecimento e por ter me dado esta oportunidade de aprendizado.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por esses “5” anos de aprendizado.

Aos meus pais por me incentivarem estudar.

Ao meu irmão por ter me guiado até Ouro Preto e a UFOP.

A minha namorada por estar presente nessa caminhada.

A República Matutos por esses anos de convivência.

A UFOP pelo ensino de qualidade.

*“Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu.”*

Érico Veríssimo

## RESUMO

NARDE, G. Análise técnica de um sistema de cogeração aplicado a um supermercado localizado no município de Aracruz-ES. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

A cogeração consiste no aproveitamento de duas ou mais formas de energia oriunda da energia primária do combustível, aumentando a eficiência na geração de energia e reduzindo o desperdício. Logo, a cogeração é uma alternativa sustentável em comparação com os ciclos básicos das máquinas térmicas. O presente trabalho propõe um sistema de cogeração pra ser instalado em um supermercado de médio porte com a finalidade de atender a demanda elétrica do estabelecimento e a implantação de um sistema de condicionamento no estabelecimento. Este trabalho abrange a busca da configuração e dos equipamentos que melhor se adequam as necessidades energéticas do estabelecimento e a análise técnica do sistema de cogeração proposto. Também consiste numa pesquisa de caráter bibliográfico, quantitativa, descritiva, de observação direta e de estudo de caso. Os sistemas de cogeração propostos e analisados são baseados na utilização de microturbina, motores de combustão interna e sistemas de refrigeração por absorção e por compressão. Os sistemas foram analisados em paridade térmica para atendimento das necessidades térmicas do supermercado. Como houve uma produção excedente de energia elétrica, esta pode ser inserida na rede de transmissão da concessionária e utilizada no período em que o sistema de cogeração não esteja operando. O panorama contendo uma microturbina e sistema de refrigeração por absorção (panorama 8) é o mais indicado pois obteve 70,20% de eficiência global de cogeração, um pouco acima dos outros panoramas propostos que obtiveram até 65,40% e é capaz de gerar 183,2 kWe. Este panorama tem um excedente de energia elétrica superior ao panorama contendo também uma microturbina e sistema de refrigeração por absorção usando outro equipamento (panorama 7), este fato foi utilizado para indicar o panorama 8 como o mais apropriado para a aplicação em sistema de cogeração aplicado ao supermercado.

**Palavras-chave:** cogeração, supermercado, eficiência energética, ciclo Diesel, ciclos de refrigeração, ciclo Brayton.

## **ABSTRACT**

*NARDE, G. Technical analysis of a cogeneration system applied to a supermarket located in Aracruz-ES. 2017. Monography (Graduation in Mechanical Engineering). Federal University of Ouro Preto*

*Cogeneration consists of taking advantage of two or more energy forms from the primary energy of the fuel, increasing the efficiency in the energy generation and reducing waste. Therefore, the cogeneration is a sustainable alternative in with the basic cycles of the thermal engines. The present work proposes a cogeneration system to be installed in a medium-sized supermarket with a purpose of electrical service of the establishment and a deployment of a conditioning system in the establishment. This work is based on the search for the configuration and equipment that best suits the energy needs of the establishment and a technical analysis of the proposed cogeneration system. In addition, there is a bibliographic, quantitative, descriptive, direct observation and case study research. The proposed and analyzed cogeneration systems are based on the use of microturbine, internal combustion engines and absorption and compression refrigeration systems. The systems were analyzed in thermal parity to meet the thermal needs of the supermarket. As there was a surplus production of electric energy, it can be inserted in the transmission network of the concessionaire and used in the period in which the cogeneration system is not operating. The panorama with a microturbine and absorption refrigeration system (panorama 8) is the most indicated because it obtained 70.20% of global cogeneration efficiency, slightly above the other proposed scenarios that obtained up to 65.40% and is capable of generating 183.2 kWe. This panorama has a surplus of electrical energy superior to the panorama also containing a microturbine and absorption refrigeration system using another equipment (panorama 7), this fact was used to indicate the panorama 8 as the most appropriate for the cogeneration application in the supermarket.*

**Keywords:** *Cogeneration, supermarket, energy efficiency, Diesel cycle, cooling cycles, Brayton cycle.*

## LISTA DE SIMBOLOS

ALFA	- Razão entre a potência elétrica e a potência térmica consumida no segmento [kWe/kWth]
k	- Coeficiente isentrópico
C	- Cilindrada [m <sup>3</sup> ]
C <sub>p</sub>	- Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]
C <sub>v</sub>	- Calor específico a volume constante [kJ/kg.K]
COP <sub>absorção</sub>	- Coeficiente de performance do ciclo de compressão por absorção de calor [-]
E	- Potência eletromecânica consumida no segmento [kWe]
E'	- Potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração [kWe]
h <sub>i</sub>	- Entalpia no ponto "i" [kJ/kg]
m	- Massa [kg]
<i>m</i>	- Fluxo mássico [kg/s]
P <sub>i</sub>	- Pressão no ponto "i" [bar ou kPa]
PCI	- Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PME	- Pressão média efetiva [MPa]
Q <sub>e</sub>	- Calor fornecido [kW]
Q <sub>F</sub>	- Calor absorvido pelo espaço refrigerado [kW]
Q <sub>H</sub>	- Calor fornecido [kW]
Q <sub>L</sub>	- Calor rejeitado [kW]
r	- Razão de corte [-]
S	- Potência térmica consumida no segmento [kWth]
S'	- Potência térmica gerada pelo sistema de cogeração [kWth]
T <sub>i</sub>	- Temperatura no ponto "i" [°C ou K]
TC	- Taxa de compressão [-]
<i>v<sub>i</sub></i>	- Volume específico no ponto "i" [m <sup>3</sup> /kg]
VPMI	- Volume no ponto morto inferior [m <sup>3</sup> ]
VPMS	- Volume no ponto morto superior [m <sup>3</sup> ]
W	- Potência [kW]
W <sub>ciclo</sub>	- Trabalho do ciclo [kJ/kg]
W <sub>e</sub>	- Potência fornecida ao compressor [kW]
W <sub>liq</sub>	- Potência líquida [kW]
η <sub>g,cog</sub>	- Eficiência global da cogeração [%]
η <sub>t,Diesel</sub>	- Eficiência térmica do ciclo Diesel [%]
η <sub>t,Brayton</sub>	- Eficiência térmica do ciclo Brayton [%]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo da reestruturação do setor de energia elétrica no Brasil. ....	10
Figura 2 - Estrutura do setor energético brasileiro. ....	11
Figura 3 - Alternativa de geração de energia: (a) independente (b) cogeração. ....	14
Figura 4 – Tipos de ciclos de cogeração: (a) <i>topping</i> e (b) <i>bottoming</i> . ....	16
Figura 5 - Ciclo Diesel de quatro tempos. ....	20
Figura 6 - Diagrama P-v e T-s do ciclo Diesel. ....	21
Figura 7 – Sistema típico de um ciclo de refrigeração por absorção de calor. ....	24
Figura 8 - Princípio básico de um sistema de refrigeração por absorção de calor de água-brometo de lítio. ....	25
Figura 9 - Distribuição dos consumos de energia em um supermercado. ....	29
Figura 10 - Fluxograma das etapas realizadas. ....	33
Figura 11 - Índice Pluviométrico anual de Aracruz – ES. ....	37
Figura 12 - Média de Temperaturas anual em Aracruz – ES. ....	37
Figura 13 - Consumo elétrico do estabelecimento de setembro de 2014 até agosto de 2015. .	38
Figura 14 - Demanda elétrica do estabelecimento de setembro de 2014 até agosto de 2015. .	39
Figura 15 - Desenho esquemático da configuração proposta com a utilização de motores de combustão interna. ....	44
Figura 16 - <i>Chillers</i> de absorção de calor. O <i>chiller</i> da marca Thermax é o A. Já o <i>chiller</i> da marca LG é o B. ....	46
Figura 17 - Motor de combustão interna da VOLVO PENTA, modelos TAD1342GE e TAD1343GE. ....	48
Figura 18 - Desenho esquemático da configuração 2. ....	49
Figura 19 - A esquerda tem-se o <i>chiller</i> da marca HITACHI. Já o <i>chiller</i> da direita é da marca CARRIER. ....	50
Figura 20 - Motor de combustão interna da VOLVO PENTA, modelo TAD734GE. ....	50
Figura 21 - Desenho esquemático da configuração 3. ....	52

Figura 22 - Microturbina CAPSTONE C200.....	54
Figura 23 - Desenho esquemático da configuração 4.....	54
Figura 24 - Resumo comparativo entre os 10 panoramas. ....	62

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Classificação dos consumidores no setor elétrico do Brasil. ....	13
Tabela 2 - Evolução da cogeração.....	16
Tabela 3 - Razão calor/potência elétrica e outros parâmetros do sistema de cogeração. ....	19
Tabela 4 - Temperatura de evaporação em relação a mínima temperatura do calor disponível para sistemas de refrigeração por absorção usando o par água-amônia. ....	27
Tabela 5 - Variáveis e Indicadores de Pesquisa. ....	34
Tabela 6 – Equipamentos do estabelecimento.....	40
Tabela 7 – Equipamentos do estabelecimento.....	41
Tabela 8 – Ventiladores dos evaporadores e condensadores.....	42
Tabela 9 – Dados dos catálogos dos sistemas de refrigeração por absorção.....	45
Tabela 10 – Dados dos motores de combustão interna selecionados.....	47
Tabela 11 – Parâmetros dos <i>chillers</i> de compressão. ....	49
Tabela 12 – Dados dos motores de combustão interna da configuração 2.....	51
Tabela 13 – Dados da turbina a gás utilizado na configuração 3. ....	53
Tabela 14 – Parâmetros dos <i>chillers</i> de absorção de calor. ....	55
Tabela 15 – Parâmetros dos <i>chillers</i> de compressão. ....	56
Tabela 16 – Parâmetros dos motores de combustão interna.....	57
Tabela 17 – Parâmetros da microturbina.....	59
Tabela 18 – Resumo comparativo dos modelos propostos. ....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	5
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral .....	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho .....	6
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1	O Setor Energético Brasileiro.....	7
2.2	A cogeração .....	14
2.3	Cogeração com Motor do Ciclo Diesel .....	20
2.4	Cogeração com ciclo de refrigeração por absorção de calor .....	23
2.5	Supermercados.....	27
2.6	Cogeração em Supermercados.....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	31
3.2	Materiais e Métodos .....	33
3.3	Variáveis e Indicadores .....	34
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	35
3.5	Tabulação de Dados.....	35
3.6	Considerações Finais do Capítulo .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1	Caracterização do Estabelecimento .....	36
4.2	Análise da Demanda do Estabelecimento .....	38
4.2.1	Cálculo da demanda térmica futura .....	43
4.2.2	Considerações finais sobre a demanda do estabelecimento .....	43
4.3	Sistema de cogeração proposto.....	44
4.3.1	Equipamentos selecionados na configuração 1 .....	45
4.3.2	Equipamentos selecionados na configuração 2 .....	49
4.3.3	Equipamentos selecionados na configuração 3 .....	52
4.3.4	Equipamentos selecionados na configuração 4 .....	54

4.3.5	Resumo da análise energética dos equipamentos selecionados.....	55
4.4	Resumo das configurações dos sistemas propostos.....	60
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
5.1	Conclusões.....	64
5.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	65
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma abordagem sobre o tema da pesquisa, a cogeração, a sua importância no setor comercial referente a supermercados, e também se realiza uma contextualização do problema abordado neste trabalho por meio dos conceitos e análises da aplicabilidade dos ciclos e dos elementos que constituem os sistemas de cogeração.

Portanto, o primeiro capítulo refere-se à apresentação do problema, os motivos de sua origem, a razão pela qual será realizado, os objetivos e a estrutura do trabalho.

### 1.1 Formulação do Problema

O crescimento econômico de um país está fortemente vinculado ao seu consumo energético e o número populacional. Quando a demanda de energia aumenta significa que o país está crescendo, que as indústrias, comércios e serviços estão em ritmo de crescimento, e que cada vez mais é preciso desenvolver novas tecnologias e melhorar as já existentes para poder suprir a necessidade energética do país e aumentar sua competitividade (ANEEL, 2008).

Todavia em momentos de crises mundiais em que as indústrias e os comércios são negativamente afetados, tem-se a necessidade de redução de custos para a sua manutenção no mercado. Dentre esses custos, o gasto energético tem uma forte participação e é importante e necessário reduzi-lo.

Levando em conta a expectativa da economia brasileira de 2016 de acordo com as previsões feitas pelo FMI (Fundo Monetário Internacional), que deve ser negativa e em torno de 4,3%, em contrapartida a expectativa da economia mundial crescer em 3,6%, o que significa que, no cenário global atual, o Brasil está com a economia profundamente abalada. Na América Latina, a economia brasileira só deve ficar a frente da Venezuela que deve decrescer 6% em 2016 (NAIME *et al*, 2016).

Em relação ao consumo nacional de energia elétrica, o sistema integrado nacional atingiu a marca de 37.701 GWh em setembro de 2015, o que é considerado um recuo de 3,1%

se comparado a setembro de 2014. Todas as classes de consumo apresentaram uma retração de 6,3% na indústria; 1,7% nas residências; e 0,8% no comércio e serviços (EPE, 2015a).

O Brasil supre sua necessidade de energia com diversificadas fontes, sendo as principais fontes o óleo diesel (18,8%), eletricidade (17,2%), bagaço de cana (10,8%), gasolina (9,7%), gás natural (7,1%), lenha (6,3%), etanol (5,1%), dentre outras (EPE, 2015b).

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015b), essas fontes fornecem energia principalmente para o setor de transporte, setor industrial e de agropecuária. As residências e serviços em geral totalizam cerca de 14% do consumo energético brasileiro. No que se refere a produção de energia elétrica no Brasil, é constituída basicamente pelas seguintes fontes: hidráulica (65,2%), gás natural (13,0%), biomassa (7,3%), derivados do petróleo (6,9%), carvão e derivados (3,2%), nuclear (2,5%) e eólica (2,0%). É importante ressaltar que a energia eólica cresceu 85,6 % no ano de 2014 em relação ao ano anterior e essa forma de energia tem elevado índice de crescimento a cada ano. Isso se deve pelo programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (PROINFA) e pelo baixo custo de produção dessa energia quando comparada às outras.

Nos últimos anos, mesmo com a construção de mais usinas hidrelétricas, a energia hidráulica teve sua participação na produção geral de energia elétrica reduzida devido ao baixo nível que os reservatórios mostraram. Para manter a necessidade energética do país e uma maior confiabilidade do sistema, os órgãos responsáveis pela geração e distribuição foram obrigados a colocar as centrais termelétricas em pleno funcionamento (EPE, 2015).

Essas termelétricas utilizam como fonte de energia principalmente o gás natural e o óleo. A produção de energia elétrica das termelétricas é mais cara que nas hidrelétricas. Este fato provocou um aumento significativo nas contas de energia dos consumidores. Outro fator que agravou a situação foi o aumento dos preços dos combustíveis fósseis (EPE, 2015).

É importante ressaltar que com o aumento da utilização dos combustíveis fósseis, as emissões de dióxido de carbono aumentaram significativamente. Entretanto, quando comparado a taxa de emissão de dióxido de carbono do Brasil com países europeus, o Brasil está abaixo da média desses países (MME, 2014).

Com esse aumento das tarifas sobre as fontes de energia, principalmente a energia elétrica, os setores industriais, de serviços e de comércio procuram soluções para tal situação, como investimento em projetos de geração, distribuição, cogeração ou eficiência de energia

elétrica, buscando a redução dos custos, aumento da confiabilidade e/ou garantia no fornecimento (ABRACEEL, 2016).

Os sistemas de cogeração são aplicados quando processos e/ou equipamentos necessitam de energia elétrica e energia térmica. Na produção desses insumos energéticos separadamente, a eficiência dos equipamentos e máquinas são relativamente baixas. Com a aplicação da cogeração, a produção desses insumos é concomitante. Com isso, há uma redução do consumo das fontes de energia, quando os insumos são produzidos em separado.

As principais aplicações da cogeração são realizadas combinando os ciclos Rankine (turbina a vapor), Brayton (turbina a gás), Diesel e Otto. Também é possível a sua aplicação no ciclo de refrigeração por absorção de calor (BARJA, 2006).

Uma aplicação em que se obtém um grande ganho de eficiência é a utilização dos gases residuais de uma turbina a gás para gerar vapor e se transformado em energia com o ciclo Rankine (turbina a vapor). Um aspecto importante a ser analisado é o valor do investimento que quanto maior o investimento, maior será o ganho em eficiência (BARJA, 2006).

É possível utilizar a cogeração usando somente um desses ciclos, principalmente em indústrias, onde se tem um dos quatro ciclos térmicos gerando energia elétrica e o sistema de aproveitamento térmico utilizando os gases residuais para recuperar calor e utilizá-lo em algum processo dentro da própria indústria, sem a necessidade desse calor ser gerado em uma caldeira. Com isso, diminui-se o consumo de insumos energéticos e não é necessário adquirir uma caldeira (ANDREOS, 2013).

Quando se fala em energia térmica, refere-se à produção de energia térmica quente e fria. A energia térmica quente é a altas temperaturas (acima da temperatura ambiente), e a energia térmica fria é a baixas temperaturas (abaixo da temperatura ambiente). Essas baixas temperaturas são produzidas em sistemas de refrigeração que utilizam a energia elétrica como insumo para seu funcionamento. Porém, foram desenvolvidas tecnologias para produção de energia térmica fria que utilizam como principal fonte de energia a energia térmica quente.

Com essa capacidade de transformação de energia quente em fria, a cogeração possui uma boa aplicabilidade onde se necessitam de energia elétrica e energia térmica fria, pois na produção da eletricidade, os motores e turbinas, rejeitam gases a altas temperaturas. Esses gases podem ser utilizados nos sistemas de refrigeração por absorção de calor. Com isso, pode

ser resfriar e climatizar ambientes com baixo custo econômico. (MARTINELLI, 2002, *apud* DEL CARLO, 2007).

Uma boa aplicação disso é nos supermercados, no qual é indispensável o resfriamento e condicionamento de vários produtos, como laticínios, carnes e hortifrúteis. Também é interessante a climatização dos ambientes, pois pode proporcionar um conforto térmico para seus colaboradores e para seus clientes.

Em supermercados, a energia é consumida principalmente em três setores. O setor de iluminação, o setor de refrigeração e o setor de climatização, quando há. Um aspecto importante relacionado ao gasto energético de supermercados é a troca dos equipamentos velhos ou que possuem baixas eficiências energéticas em equipamentos mais modernos, além disso, é extremamente interessante a inspeção e controle desses equipamentos. Isso porque os equipamentos de refrigeração e climatização representam 70% do consumo de energia elétrica, em alguns casos (OLIVEIRA, 2010).

A demanda de energia em um supermercado não é constante ao longo do dia. O maior consumo se dá no período das nove às dezoito horas durante um dia típico. Isso se deve pelo maior número de usuários, pois esse horário compreende com o horário de funcionamento e com o fator de iluminação solar (OLIVEIRA 2010),

Segundo Bruno (2015), o gasto com energia elétrica passou a ser a segunda maior despesa em algumas redes de supermercados, ficando atrás somente da folha de pagamento e ultrapassando o valor do aluguel. Com isso, vários supermercados e redes de supermercados estão investindo em eficiência energética devido esse aumento da conta de energia. Outra maneira de investimento em eficiência energética é a utilização de sistemas de cogeração. Portanto, este trabalho visa analisar o consumo de equipamentos utilizados em um supermercado e propor uma configuração de um sistema de cogeração com fins a geração de energia elétrica.

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

**Diante dos benefícios da cogeração, qual a configuração e os parâmetros de um sistema de cogeração que melhor se enquadraria ao supermercado localizado no município de Aracruz-ES?**

## **1.2 Justificativa**

De acordo com Arteaga (2010), a cogeração pode ser dividida em grupos de acordo com a capacidade dos sistemas. Os sistemas de pequeno porte possuem capacidades de 20 kW a 1 MW e são utilizados principalmente em lojas, supermercados, hospitais, escritórios, pequenas indústrias, dentre outras aplicações.

Com as altíssimas taxas dos impostos e com o aumento periódico da conta de energia, todos os setores da economia estão buscando soluções para minimizar os acréscimos das contas de energia. Nos supermercados não é diferente, já que muitos estão voltando a atenção para a eficiência energética e também optando pela instalação de sistemas de geração de energia própria. Essa instalação além de fornecer energia mais barata, aumenta a confiabilidade do fornecimento de energia, pois os supermercados não ficam dependentes apenas do sistema de distribuição das concessionárias.

Ainda em relação ao aumento da eficiência energética, os sistemas de geração de energia, tais como motores de combustão interna ou turbinas a gás, fornecem um importante insumo para ciclos de refrigeração por absorção, que é o calor rejeitado nos gases de exaustão desses equipamentos. Então, pode-se dizer que os sistemas de cogeração podem ser vantajosos quando bem dimensionados e escolhidos adequadamente.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Analisar tecnicamente o sistema de cogeração mais indicado para o supermercado em estudo de forma a encontrar a configuração que fornece maior eficiência em termos de energia.

### **1.3.2 Específicos**

- Realizar revisão bibliográfica acerca do setor energético brasileiro, cogeração, ciclo Diesel, ciclo de refrigeração por absorção de calor e de supermercados;

- Identificar os parâmetros de caracterização dos processos no estabelecimento, tais como razão entre calor e potência, capacidade frigorífica, combustível usado, eficiência termodinâmica;
- Analisar, detalhar e fundamentar o sistema de cogeração proposto;
- Sugerir trabalhos futuros.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Foi apresentada no primeiro capítulo a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo é constituído por uma fundamentação teórica dos ciclos termodinâmicos, dos ciclos de refrigeração, das demandas energéticas em supermercados e de sistemas de cogeração.

O processo metodológico da pesquisa, assim como as ferramentas necessárias para a coleta de dados que são fundamentais na obtenção dos resultados, foi apresentado no terceiro capítulo.

No quarto capítulo foram relatadas as discussões e resultados encontrados por meio da coleta de dados.

O quinto e último capítulo abrange as conclusões e as recomendações relacionadas ao tema do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do tema abordado. Esta será baseada em uma breve caracterização do setor energético brasileiro e na exposição dos conceitos, ciclos e configurações da cogeração, dando ênfase a análise técnica dos sistemas envolvendo motores de combustão interna e sistema de refrigeração, assim como toda uma conceituação e contextualização destes equipamentos. Também será abordado o supermercado no que refere ao gasto energético e seus equipamentos.

### 2.1 O Setor Energético Brasileiro

Desde a metade do século XVIII, a partir da revolução industrial, a necessidade energética mundial vem a cada ano aumentando. Não somente a necessidade energética tem-se elevado, mas também o crescimento demográfico, o aumento da produção de bens de consumo e o avanço tecnológico (CAVALCANTE *et al.*, 2011).

Diante desses acontecimentos, a humanidade voltou-se para a questão ambiente, uma vez que percebeu uma crescente e indisciplinada utilização dos recursos naturais. Em decorrência da industrialização e do avanço científico, percebeu-se que as atividades antrópicas podem ser entendidas como um forte responsável pelo aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera. Com isso, o aquecimento global pode ser perceptível e atribuído a ele as mudanças climáticas (GODOY, 2010).

Várias conferências, programas entre as nações e debates vem sendo feitos perante a preocupação com o meio ambiente. Mas o grande marco que deu início a essa discussão foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizado no ano de 1972, em Estocolmo. A partir dessa Conferência foi criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (REIS, 2005).

Outro grande marco para a preservação e uso consciente dos recursos naturais foi a Conferência Mundial das Nações Unidas e Desenvolvimento – Conferência da Cúpula da

Terra (*Earth Summit*) realizada no Rio de Janeiro no ano de 1992. Nela estabeleceu uma nova parceria global entre os Estados, os setores-chave da sociedade e os indivíduos (REIS, 2005).

No ano de 1997, na cidade de Quioto, já na terceira Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, foi criado o Protocolo de Kyoto, que estabelecia metas de redução de emissões de gases de efeito estufa para os países desenvolvidos. Só foi possível a elaboração desse protocolo pois diversos países entraram em acordo de forma voluntária e consensual (CHANDER, 2006 *apud* GODOY, 2010).

Em decorrência da importância com o meio ambiente e de seus recursos naturais, o Brasil possui uma legislação ambiental muito intensa. Isso pode ser verificado até mesmo na Constituição Brasileira de 1988, a qual estabeleceu a importância da proteção do meio ambiente.

Em função da necessidade de fornecer energia ao país para seu desenvolvimento, o governo passou por várias transformações e mudanças na estruturação do setor energético brasileiro. Para isso, criou-se vários órgãos e entidades voltadas para uma melhor administração e uma maior confiabilidade do sistema energético brasileiro. Pode-se verificar atualmente a influência que a legislação ambiental teve para o novo modelo.

Um ponto inicial para a regulamentação do setor elétrico brasileiro foi no governo de Getúlio Vargas, em 1934, onde foi realizada a promulgação do Código de Águas. Nesse código, o poder de autorização ou concessão para o aproveitamento de energia hidráulica foi atribuído à União (ALVES *et al.*, 2006).

Na constituição de 1937, as companhias estrangeiras foram proibidas de explorarem minas e novos aproveitamentos hidráulicos no país. Essa nova constituição, o código das águas e o crescimento industrial que demandava um maior consumo de energia, direcionava o país para crises de suprimento (ALVES *et al.*, 2006).

Diante do acelerado crescimento econômico no governo de Juscelino Kubitschek, foram construídas várias usinas hidrelétricas, foi fundada Furnas, uma empresa geradora de energia, e criou-se o Ministério de Minas e Energia (MME). Já em 1962, teve a criação das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás). Com isso, o setor elétrico brasileiro vinha sendo moldado organizacionalmente e regulado (GOMES *et al.*, 2009).

Durante a ditadura militar, a Eletrobrás já possuía experiência e maturidade. Com isso, o planejamento da expansão do setor energético brasileiro, feito antes pelo Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico (BNDE), foi transferido para a competência da Eletrobrás.

Nesse período da ditadura, foram criadas a Eletrosul, em 1968, e a Eletronorte, em de 1973, nesse mesmo ano foi realizado o Tratado de Itaipu, para a construção da hidrelétrica (SILVA, 2011).

Após os anos de 1973 e 1979, quando ocorreu o primeiro e o segundo choque do petróleo, respectivamente, o cenário econômico mundial ficou profundamente abalado. Como consequências, houve uma altíssima desvalorização da moeda brasileira da época e a elevação das taxas de juros no mercado internacional. Isso afetou profundamente as empresas do setor elétrico (GOMES *et al.*, 2009).

Na década de 1990, se iniciou a Reforma do Setor Elétrico Brasileiro – RESEB que objetivava a redefinição do quadro institucional e legal do setor. O projeto tinha como objetivos a desverticalização do sistema, o estímulo à competição para gerar e comercializar, e o livre acesso às redes de transmissão e distribuição. Nessa época foram criadas a Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), o ONS (Operador Nacional do Sistema) e o MAE (Mercado Atacadista de Energia Elétrica) e teve um alto nível de privatização no setor elétrico (GOLDEMBERG *et al.*, 2003).

Mesmo com as reformas anteriores, em 2001 o país passou por um grande racionamento de energia elétrica. Podem ser considerados como fatores que culminaram no racionamento, a falta de planejamento efetivo e também de monitoramento eficaz centralizado. Com isso, em 2004, foram feitos reajustes ao modelo com a finalidade de reduzir os riscos de falta de energia e melhorar o monitoramento e controle do sistema (ABRADEE, 2016).

Nesse novo modelo foram criadas ainda a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (ONS, 2016).

Todas as reformas já citadas e mostradas na Figura 1 entre outras, resultaram na estruturação do setor elétrico brasileiro, mostrado na Figura 2.

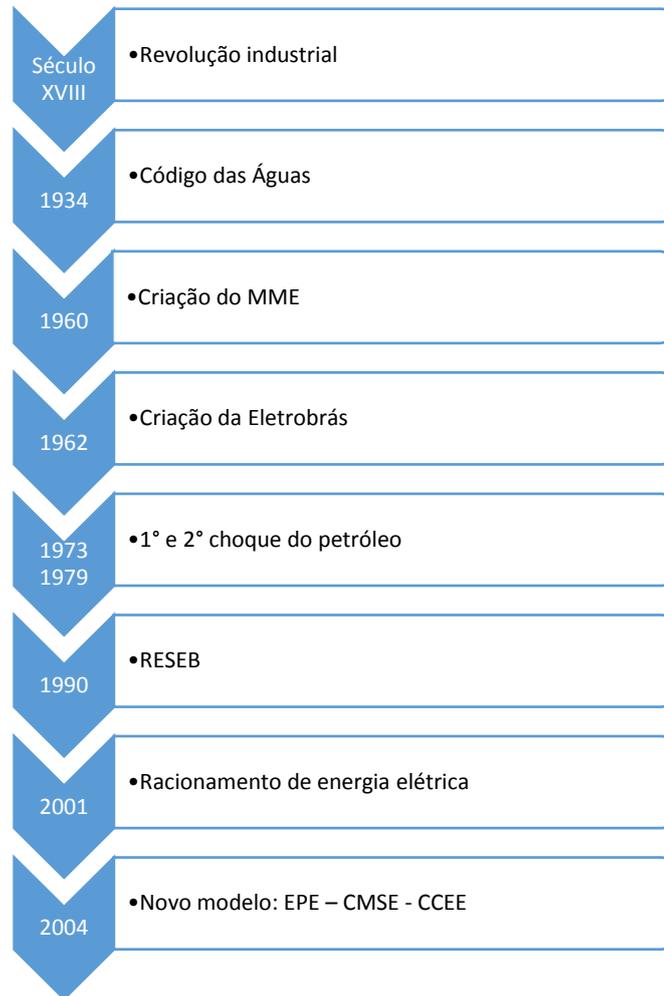


Figura 1 - Linha do tempo da reestruturação do setor de energia elétrica no Brasil.  
 Fonte: Cavalcante *et al.*, 2011. Alves *et al.*, 2006. MME, 2016. Gomes *et al.*, 2009.  
 Goldenberg *et al.*, 2003. ABRADDEE, 2016. ONS, 2016.

Na Figura 1, tem-se as datas de alguns acontecimentos que tiveram grande importância para o desenvolvimento do sistema energético brasileiro. A importância da energia no cotidiano foi alavancada pela revolução industrial fazendo com que os países precisassem se estruturar. O Brasil teve como marco inicial na sua regulação do setor energético em 1934, pelo código das Águas. Em 1960, teve a criação de um dos principais e mais importante órgão brasileiro responsável pelo planejamento e regulamentação do uso da energia, além de em 1962 ter sido criada a Eletrobrás. Pelos sucessivos choques do petróleo, foram necessárias realizar mudanças no setor energético, com isso, teve início o RESEB. Mesmo com as reformas realizadas em 1990, o Brasil sofreu um problema de abastecimento

de energia em 2001. Para consolidar o novo modelo do sistema, foram criadas em 2004, a EPE, o CSME e a CCEE.

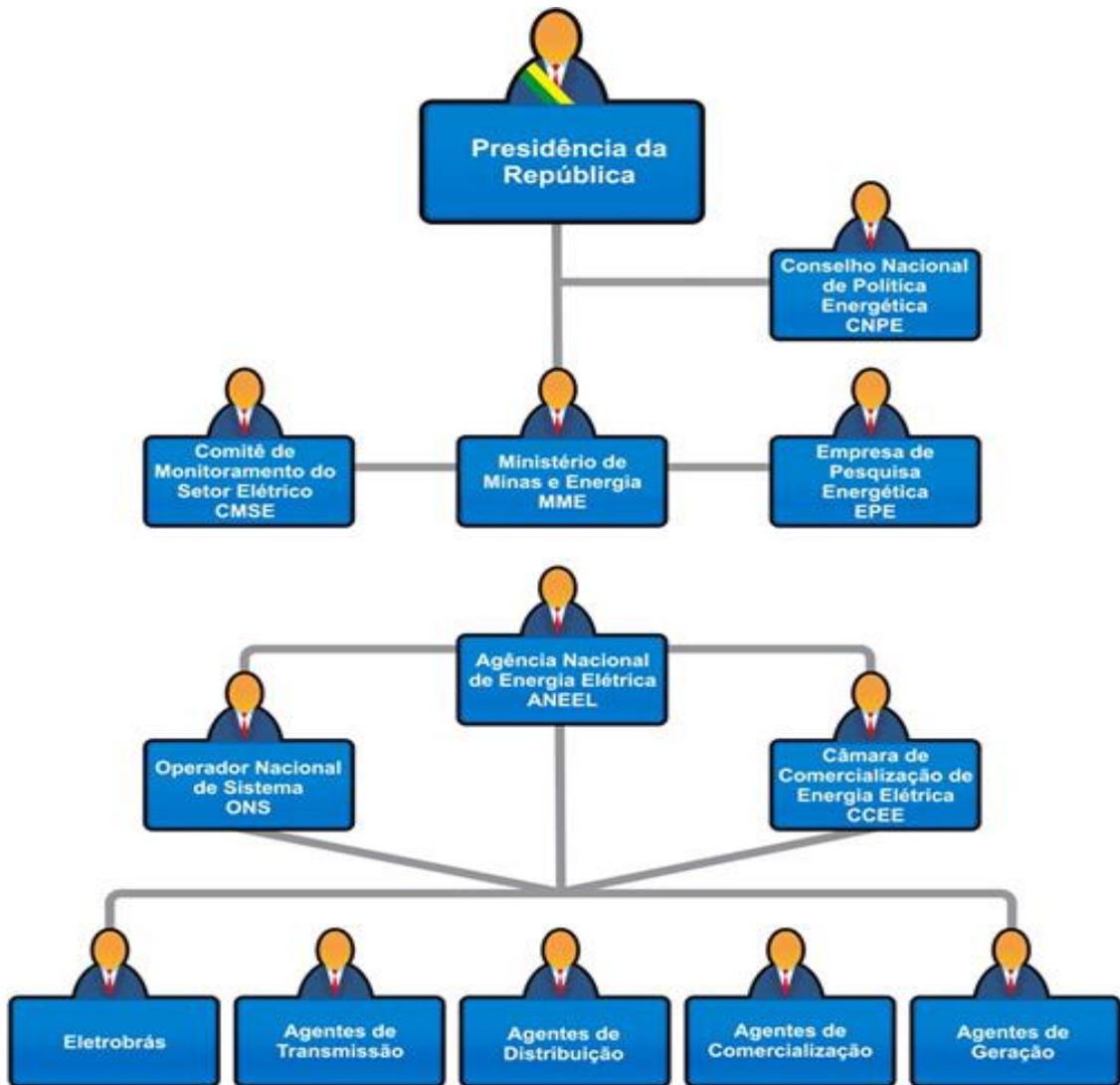


Figura 2 - Estrutura do setor energético brasileiro.  
Fonte: ABRADDEE (2016).

Na Figura 2 está ilustrada a estrutura do sistema energético brasileiro, que foi sendo moldado em função das necessidades, das políticas de desenvolvimento econômico e de planejamento. O Ministério de Minas e Energia propõe as políticas nacionais e as medidas para o setor para o Presidente em exercício. O MME conta com o auxílio da EPE, CSME e CNPE para fazer tais propostas. A ANEEL, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, possui atribuições de regulação e fiscaliza os outros órgãos, entre outras atribuições. O ONS faz coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão. A CCEE opera

o mercado brasileiro de energia elétrica. Tem-se também os agentes, responsáveis por gerar, transmitir, distribuir, e/ou comercializar, entre outras funções.

No mercado de energia elétrica, os segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização, podem ser inseridos no ambiente regulado ou no ambiente livre. A transmissão e distribuição estão inseridos no ambiente regulado pelo governo, já a geração e comercialização caracteriza o ambiente livre (concorrência aberta). Esse ambiente livre leva a otimização do mercado em relação a oferta e a formação do preço da energia elétrica (BARJA, 2006).

Segundo a Casa Civil da Presidência da República (2016), a legislação referente à cogeração de energia teve marco regulatório na Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, regulamentada pelo decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996, onde se definiu as figuras do produtor independente do autoprodutor de energia elétrica, da seguinte forma:

Art. 2º Para fins do disposto neste Decreto, considera-se:

I - Produtor Independente de Energia Elétrica, a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco;

II - Autoprodutor de Energia Elétrica, a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

De acordo com Andreos (2013), a tarifação da energia elétrica para o setor terciário pode ser classificada em dois grupos:

- Consumidores livres: nesse tipo de comercialização, a energia elétrica é comprada diretamente de produtores independentes (geradores e cogeneradores). O preço da energia é negociado entre o comprador e o vendedor e essa comercialização é feita como *commodity*.
- Consumidores cativos: a energia elétrica é comprada diretamente das concessionárias de distribuição e o preço da energia é regulamentado pelo órgão estadual e tabelado ao consumidor de acordo com critérios estabelecidos.

A Tabela 1 mostra os dois grupos tarifários existentes no sistema elétrico brasileiro, o grupo A que tem tarifa binômia, que é constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa (kWh) e a demanda faturável (kW), e o grupo B que tem tarifa

monômia, que é constituído por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (kWh). O grupo A é dividido em função do nível de tensão na qual são atendidas, e conseqüentemente, em função da demanda (kW). Os consumidores do grupo B são atendidos a uma tensão abaixo de 2,3 kV (PROCEL, 2011).

Tabela 1 - Classificação dos consumidores no setor elétrico do Brasil.

GRUPO A		GRUPO B	
A1	Tensão $\geq$ 230 kV	B1	Residencial e residencial baixa renda
A2	$88 \leq$ Tensão $\leq$ 138 kV	B2	Rural e cooperativa de eletrificação rural
A3	Tensão = 69 kV		
A3a	$30 \leq$ Tensão $\leq$ 44 kV	B3	Demais classes
A4	$2,3 \leq$ Tensão $\leq$ 35 kV	B4	Iluminação pública
AS	Subterrâneo		

Fonte: PROCEL, 2011.

De acordo com a PROCEL (2011), as tarifas do grupo A são organizadas em três modalidades de fornecimento, a tarifação convencional, que necessita de um contrato específico com a concessionária pelo qual se pactua um valor único da demanda desejada pelo consumidor, independente do período do ano ou da hora do dia. Na tarifação horo-sazonal verde o contrato independente da hora do dia e pode ser opcional para os subgrupos A3a, A4 e AS. Já na tarifação horo-sazonal azul, o contrato leva em conta a demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta e a demanda pretendida nas horas fora de ponta. A tarifação horo-sazonal azul é obrigatório para os subgrupos A1, A2 e A3.

A tarifação horo-sazonal verde varia em função do período do ano, ou seja, período úmido ou seco. Isso é feito em função dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas.

## 2.2 A cogeração

A energia é um insumo indispensável para as várias atividades humana. Os setores de transportes, produção industrial, os comércios, as conservações dos alimentos, entre outros, necessitam de energia. A geração e uso racional e eficiente da energia são fatores que vem se desenvolvendo nas sociedades, seja pelas questões ecológicas ou por motivos econômicos (competitividade, custo e lucro). Nesse aspecto, a cogeração vem sendo utilizada nos mais diversos segmentos industriais e comerciais para o máximo aproveitamento do potencial energético do combustível (MARCHIONNI, 2004).

De acordo com Balestieri (2002) *apud* Barja (2006), em um processo que necessita de energia eletromecânica e energia térmica, tem-se duas alternativas para o suprimento das demandas. A primeira alternativa supre as demandas por meio de fontes primárias distintas, onde a energia térmica necessária provém da autoprodução ou adquirida por geração independente e a energia elétrica é fornecida pelas concessionárias ou de um produtor. A segunda alternativa é o suprimento das demandas a partir de uma única fonte primária de energia, na produção simultânea de energia térmica e eletromecânica, ou seja, a cogeração. As alternativas estão ilustradas na Figura 3.

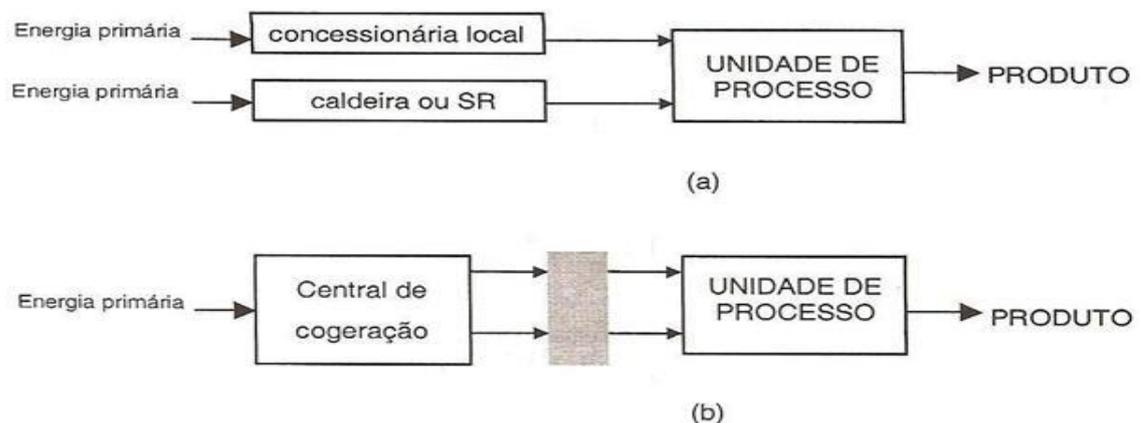


Figura 3 - Alternativa de geração de energia: (a) independente (b) cogeração.  
Fonte: Balestieri, 2003, *apud* Basquerotto, 2010.

A Figura 3 demonstra como é feito o fornecimento dos insumos energéticos necessário para um determinado processo utilizando ou não uma central de cogeração. Na letra (a), os insumos energéticos são oriundos de diferentes fontes primárias, onde a concessionária fornecendo energia elétrica e um sistema de caldeiraria fornecendo energia na forma de calor.

Já na letra (b), é demonstrado a utilização de uma central de cogeração para o fornecimento de energia elétrica e o calor, que são obtidos oriundos da mesma fonte de energia primária e que são gerados nessa central.

A cogeração tem como principal objetivo a obtenção do máximo aproveitamento da energia contida na fonte primária, fazendo assim a utilização do combustível do modo mais eficiente e mais racional possível. A cogeração pode ser utilizada em qualquer empreendimento que necessita da demanda de energia elétrica e térmica simultaneamente (ANDREOS, 2013).

Os sistemas de cogeração fazem a geração simultânea de duas formas de energia, a elétrica e a térmica, usando um mesmo combustível, por exemplo, os derivados do petróleo, o gás natural, o carvão ou a biomassa. O correto dimensionamento e balanceamento em relação a porcentagem final de cada uma das duas formas de energia aumenta o rendimento global da utilização do combustível proporcionando um incremento da eficiência energética (LINERO, 2006, *apud* BASQUEROTTO, 2010).

Quando aplicado os sistemas de cogeração, a eficiência na utilização de energia disponibilizada pelo combustível pode alcançar valores maiores que 80 % quando comparado com a média de 30-35 % em termelétricas convencionais. Essa diferença é devido a uma parcela da energia primária total ser recuperada para diferentes aplicações (ARTEAGA, 2010).

Os sistemas de cogeração podem ser classificados em função do fluxo energético, que leva em conta a ordem relativa da geração de potência e geração de calor. De acordo com essa relação, as tecnologias de cogeração podem ser classificadas em ciclos *bottoming* e *topping* (BALESTIERI, 2002, *apud* MOGAWER, 2005).

Segundo Barja (2006), o ciclo *topping* de cogeração, a energia disponibilizada pelo combustível é primeiramente aproveitada para a geração de energia eletromecânica e em seguida é aproveitado o calor útil. Já no ciclo *bottoming*, no primeiro aproveitamento do combustível é produzido calor útil a elevadas temperaturas, e sequencialmente se dá a geração de energia eletromecânica. A Figura 4, representam o ciclo *topping* (a) e *bottoming* (b).

O ciclo *bottoming* envolve a recuperação direta de calor residual para a produção de vapor e potência mecânica ou elétrica (em turbinas de condensação e/ou contrapressão). Nesse ciclo são possíveis a utilização de turbinas a gás e turbinas a vapor. No ciclo *topping* podem ser utilizados turbinas a gás, turbinas a vapor e motores de combustão interna (ciclo Diesel ou ciclo Otto) (DEL CARLO, 2007).

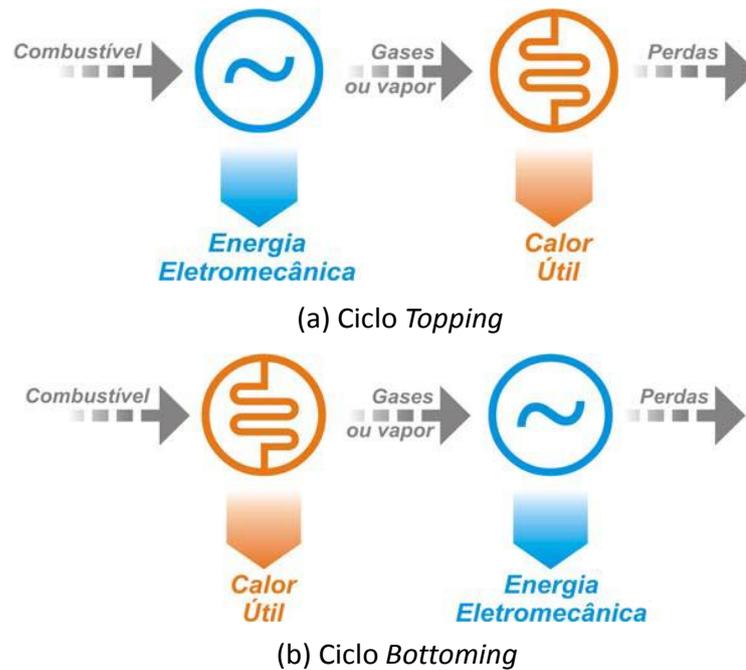


Figura 4 – Tipos de ciclos de cogeração: (a) *topping* e (b) *bottoming*.  
 Fonte: Adaptado de Nogueira *et al.* (2004).

Na Figura 4, é demonstrado a produção da energia eletromecânica e calor útil e que de acordo com a sequência de produção, observa-se a diferenciação do ciclo *topping* com o ciclo *bottoming*. Na Tabela 2, estão apresentadas algumas características básicas da cogeração tradicional e da cogeração moderna e o que as diferem.

Tabela 2 - Evolução da cogeração

	Cogeração tradicional	Cogeração moderna
Motivação básica	Autossuficiência de energia elétrica	Venda de excedentes e redução de emissões
Equipamentos de geração predominantes	Turbinas a vapor	Turbinas a gás e ciclo combinado
Combustíveis empregados	Residuais (bagaço, cascas)	Todos
Relação com a concessionária	Operação independente	Operação interligada

Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

A cogeração surgiu visando a autossuficiência de quem a utilizava, com o tempo, percebeu que poderia ser feito um melhor aproveitamento das plantas de cogeração, podendo

vender os excedentes de energia gerado. Isso também fez com que a relação com as concessionárias dependesse de uma operação interligada para a venda desses excedentes. Com o avanço das tecnologias, desenvolveram o ciclo combinado que é largamente utilizado. Além disso, esse avanço nas tecnologias possibilitaram a utilização de qualquer combustível. Todas essas mudanças podem ser observadas na Tabela 2.

O emprego das turbinas a vapor possui larga utilização e é largamente difundida nas instalações industriais. A competição com os motores de combustão interna e as turbinas a gás, é num primeiro momento, uma das várias características favoráveis que destaca a sua ampla utilização (MARTINELLI, 2002, *apud* DEL CARLO, 2007).

Conforme Zoratto (2002), *apud* Del Carlo (2007), algumas características que dão alta relevância a utilização das turbinas a vapor na implantação das usinas termelétricas são o curto prazo para instalação, custos fixos comparativamente menores e a segurança operacional.

Segundo Lora e Nascimento (2004), um sistema de cogeração deve ser selecionado, especificado, avaliado e implementado criteriosamente devido ser uma tarefa complexa e que para isso é necessário ter conhecimento detalhado das demandas de eletricidade e calor e os seus custos. Para selecionar o sistema de cogeração é importante se ter estudos técnicos e econômicos para selecionar o melhor sistema, já que para uma mesma necessidade existe mais de uma solução possível. Algumas características para serem analisadas afim de se fazer uma correta seleção são:

- Os investimentos necessários para implantação, operação e manutenção;
- Tarifas de eletricidade da concessionária;
- Preço do calor (quando adquirido);
- A produção de calor útil por unidade de energia elétrica produzida;
- Preço e disponibilidade dos combustíveis utilizados;
- A eficiência na geração de eletricidade;
- Impactos ambientais;
- Incentivos fiscais;
- Nível de retorno financeiro esperado.

As plantas de cogeração também deve ser projetadas e analisadas em função das condições de operação, ou seja, utilizando os dados das relações entre energia elétrica e energia térmica produzidos ( $\alpha$ ) e consumidos ( $\beta$ ). Assim tem-se definidos os seguintes parâmetros adimensionais (LORA e NASCIMENTO, 2004):

$$\alpha = \frac{E_C}{Q_C} = \frac{\text{Energia elétrica consumida}}{\text{Calor útil consumido}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{E_P}{Q_U} = \frac{\text{Energia elétrica produzida}}{\text{Calor útil produzido}} \quad (2)$$

De acordo com Semae (2011), *apud* Fabres (2014), para projetar um sistema de cogeração existem quatro modos de operação e cada uma delas é específica para cada situação, e também deve levar em conta a estratégia adotada pela empresa. Esses quatro modos de operação são:

- Paridade térmica: nesse tipo de operação, o calor é o produto principal e a energia elétrica é o subproduto, o sistema de cogeração deve ser capaz de fornecer a necessidade de calor para qualquer período de operação. Também deve ser feita a conexão do sistema à rede da concessionária para venda ou compra de energia elétrica;
- Paridade elétrica: nesse modo de operação, a energia elétrica é o produto principal e o calor é o subproduto, e o sistema de cogeração também deve ser capaz de fornecer a demanda elétrica necessária para qualquer período de operação. Se houver falta de calor para os processos, pode-se utilizar um sistema auxiliar para suprir esse déficit;
- Operação econômica: nesse tipo de operação, o sistema de cogeração deve atender critérios econômicos de funcionamento. Com isso, o sistema pode produzir uma parcela, a totalidade ou mais que a demanda elétrica, variando de acordo com as tarifas de venda e compra da energia elétrica. Quando tiver um déficit de energia elétrica, ela será suprida pela concessionária, e quando tiver

excesso, este será vendido. Também pode-se utilizar um sistema suplementar para prover a falta de calor;

- Cargas parciais: o sistema de cogeração é subdimensionado nesse modo de operação. As demandas térmicas e elétricas não serão totalmente supridas pelo sistema de cogeração, onde o restante da demanda elétrica deve ser comprado da concessionária e o restante da demanda térmica produzido por um equipamento suplementar.

Na Tabela 3 têm alguns tipos de configuração de sistemas de cogeração possíveis, e cada configuração tem seus parâmetros característicos.

Tabela 3 - 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 e 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.

Na Tabela 3 têm os sistemas de cogeração mais utilizados e difundidos no mercado e alguns parâmetros típicos de cada sistema, como a razão calor/potência e a potência de saída, sendo eles muito importantes para a correta seleção do sistema de cogeração de acordo com a necessidade. Também tem a eficiência global de cada sistema.

### 2.3 Cogeração com Motor do Ciclo Diesel

O ciclo Diesel rege os processos dos motores alternativos de ignição por compressão. Esse motor foi proposto por Rudolph Diesel, nos anos de 1890, nele o ar é comprimido até uma temperatura acima da necessária para a autoignição do combustível. O combustível vai sendo injetado nesse ar e com isso ocorre a combustão (ÇENGEL *et al.*, 2006).

Os motores a diesel podem ser projetados para altas taxas de compressão em função do combustível ser injetado na câmara de combustão apenas depois do ar já estar comprimido, diferentemente dos motores de combustão que realizam o ciclo Otto (ÇENGEL *et al.*, 2006).

O funcionamento dos motores de combustão interna é ilustrado na figura 5. Onde o deslocamento do pistão sobre o embolo provoca a sucção do ar e do combustível. Depois da sucção, a mistura do ar com combustível sofre compressão. No final do processo de compressão ocorre a conversão de energia química em energia térmica, nesse instante, a temperatura e pressão são elevados e fazem o pistão se deslocar para a posição inicial e assim gerando trabalho mecânico, já que o pistão está conectado a um eixo de manivelas, que transforma o movimento alternativo em rotativo (FABRES, 2014).

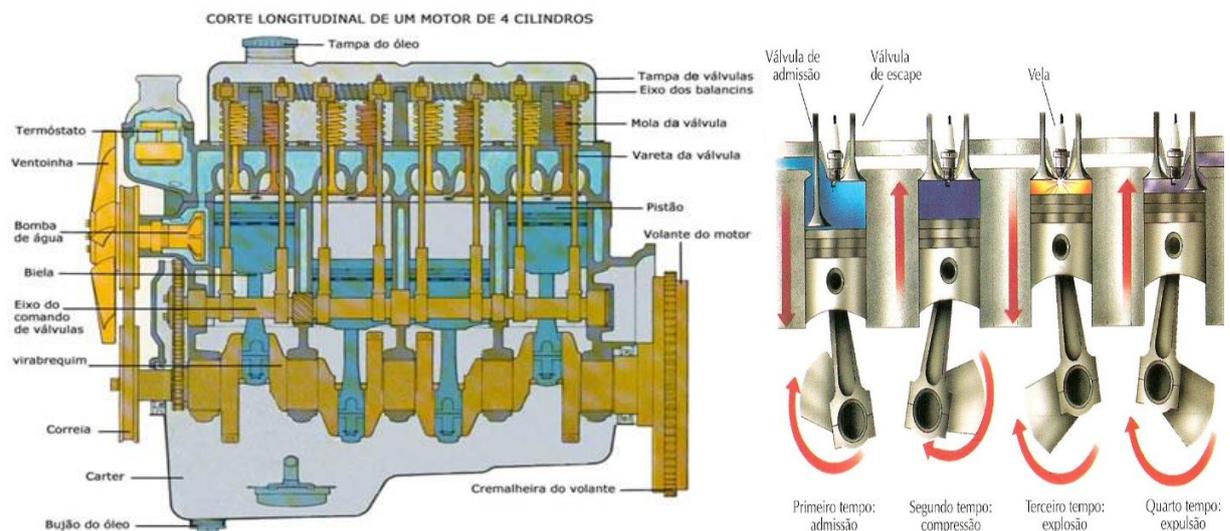


Figura 5 - Ciclo Diesel de quatro tempos.

Fonte: Adaptado de Brasil Escola (2016), Lemes, P. H. C. (2010).

Na figura 5 tem a representação de um motor de combustão interna a diesel com alguns elementos principais, como o bloco, biela cabeçote válvulas e outros. Também está demonstrado o processo de fornecimento de movimento que é feito pelos processos de admissão, compressão, combustão e por último o escape dos gases, que através dos pistões e das bielas geram o movimento alternativo rotativo.

Na Figura 6 apresenta-se o ciclo Diesel nos diagramas P-v e T-s representados e de acordo com Brunetti (2014), o ciclo é constituído pelos seguintes processos:

- 1 - 2: a mistura sofre compressão isentrópica.
- 2 - 3: é feita a ignição da mistura ar-combustível e é liberado então calor devido à explosão da mistura. O processo ocorre a pressão constante.
- 3 - 4: ocorre o processo de expansão isentrópica, que causa o movimento do pistão.
- 4 - 1: nessa etapa ocorre a abertura da válvula de escape e tem-se a rejeição de calor a volume constante.

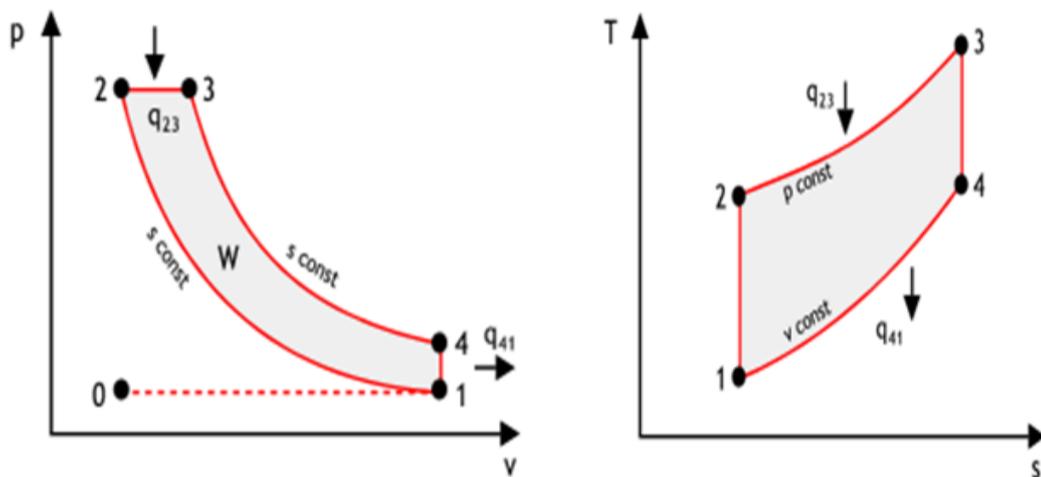


Figura 6 - Diagrama P-v e T-s do ciclo Diesel.  
Fonte: MSPC, 2016.

Na Figura 6 está representado o ciclo diesel por meio dos diagramas de pressão *versus* volume e de temperatura *versus* entropia e está ilustrada a variação dos parâmetros em relação aos processos de admissão, compressão, combustão e exaustão dos gases. Também pode se

verificar a adição de calor do processo de 2 – 3 quando ocorre o processo de combustão, e a rejeição de calor no processo 4 – 1 por meio da exaustão dos gases de combustão.

De acordo com Brunetti (2014), a eficiência térmica dos motores de combustão interna a ciclo Diesel é regida pelas seguintes equações:

$$\eta_{t,Diesel} = \frac{w_{líq}}{q_e} = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4 / T_1 - 1)}{kT_2(T_3 / T_2 - 1)} \quad (3)$$

$$\eta_{t,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (4)$$

Sendo que:

$$r = \frac{V_3}{V_2} \quad (5)$$

Segundo Fabres (2014) *apud* Barja (2006), os motores de combustão interna podem ser excelentes escolhas para serem utilizados em plantas de cogeração de pequeno e médio porte, como prédios comerciais, hospitais e supermercados.

O rendimento térmico dos motores de combustão interna se aproxima aos das turbinas a vapor ou a gás, porém, apresentam uma maior dificuldade de recuperação de calor que é restrita a baixas temperaturas. Mas em várias situações os motores se apresentam como melhor alternativa que as turbinas. No tangente as perdas de calor nos motores de combustão interna, elas ocorrem nos gases de escapes, no óleo lubrificante, na água ou no ar de arrefecimento e através da superfície do motor. Com isso, o rendimento global dos motores Diesel se compreende entre 30% e 45% (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Uma vez que esse calor perdido está disponível, poderá ser feito a recuperação por meio de alguns sistemas. Tem a recuperação de energia na camisa do motor como água quente e com temperatura compreendida entre 85 e 90 °C. Já a energia recuperada dos gases de exaustão, que geraram água quente ou vapor, pode ser utilizada para aquecimento de ambientes, em processos, ou no resfriamento por absorção de calor (ARTEAGA, 2010).

Os motores diesel são utilizados principalmente para sistemas de cogeração de grande porte, porém também podem ser usados para sistemas de cogeração de pequeno porte. Os

combustíveis utilizados são o diesel ou óleo pesado. Também podem ser operados utilizando um combustível chamado dual, onde tem-se uma grande porcentagem de gás natural com uma pequena porcentagem de diesel piloto (ONOVWIONA, UGURSAL, 2016 *apud* ARTEAGA, 2010).

No que refere a utilização do gás natural com diesel como combustível, a parcela de diesel misturado ao gás natural é na faixa de 3 – 5%. Para que haja a combustão dessa mistura é necessário o uso de compressores de alta potência para que seja fornecida pressões elevadas ao gás e este ser injetado nos cilindros de combustão (BRANDÃO, 2004).

## 2.4 Cogeração com ciclo de refrigeração por absorção de calor

O princípio de funcionamento do ciclo de refrigeração por absorção data do ano de 1700, quando descobriram que poderia produzir gelo através da evaporação da água pura de um vaso contida em um recipiente evacuado e com ácido sulfúrico. Porém em 1859, Ferdinand Carré criou uma máquina com o mesmo princípio, mas que utilizava amônia e água. Em 1950 foi introduzido o par brometo de lítio e água (PALMIERI, 2013).

Este ciclo é economicamente viável quando existir uma fonte de energia térmica com temperaturas entre 100 e 200 °C. Energias com a geotérmica, solar, calor rejeitado por usinas de cogeração e por processos podem ser utilizados como uma fonte de energia térmica para ser possível a utilização do ciclo de refrigeração por absorção. (ÇENCEL & BOLES, 2006).

De acordo com Çencel & Boles (2006), o coeficiente de performance (COP) é definido pela seguinte equação:

$$COP_{\text{absorção}} = \frac{\text{Saída desejada}}{\text{Entrada necessária}} = \frac{Q_F}{Q_{Ger} + W_{\text{bomba,e}}} \cong \frac{Q_F}{Q_{ger}} \quad (6)$$

Nesse sistema de refrigeração, é necessário realizar a absorção de um refrigerante pelo uso de um transportador. O sistema mais empregado é o par amônia e água, onde a amônia funciona como refrigerante e a água funciona como o meio de transporte. Existem também os sistemas água-cloreto de lítio e água-brometo de lítio, neles a água funciona como o refrigerante e servem para aplicações limitadas, já que as mínimas temperaturas atingidas por

esses sistemas estão acima da temperatura de congelamento da água (ÇENCEL & BOLES, 2006).

Segundo Guimarães (2011, p. 23), o ciclo de absorção funciona da seguinte forma:

O sistema de absorção funciona a partir do calor gerado na fonte térmica que é fornecido ao gerador onde o par refrigerante-absorvente se encontra. Após atingir a temperatura de desprendimento parte do refrigerante se separa do absorvente em forma de vapor e segue para o condensador, para o dispositivo de expansão e, em seguida, para o evaporador de forma semelhante ao ciclo de compressão de vapor. Saindo do evaporador, o refrigerante é absorvido pela solução que se encontra no absorvedor e então é bombeado de volta para o gerador iniciando o ciclo novamente.

O ciclo de absorção possui quatro processos, onde dois processos são caracterizados por trocas de calor e nos outros dois ocorrem trocas de calor e massas, simultaneamente. Os processos são a vaporização do refrigerante, a absorção do refrigerante pela solução contida no absorvedor, a separação do refrigerante dentro do gerador e por último a condensação do refrigerante no condensador (GUIMARÃES, 2011). Na Figura 7, está representado um esquema típico de um ciclo de refrigeração por absorção de calor. Já na Figura 8, tem a representação de um ciclo de refrigeração por absorção que utiliza água-brometo de lítio.

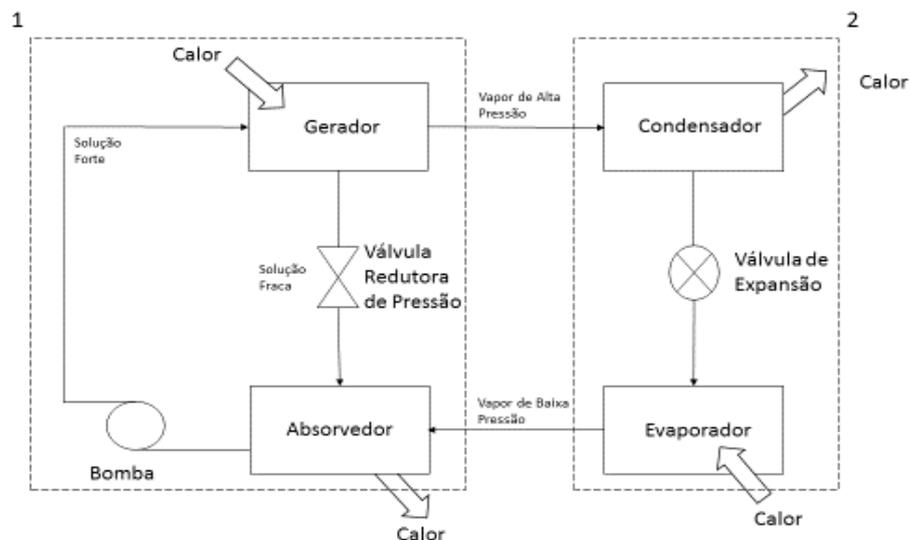


Figura 7 – Sistema típico de um ciclo de refrigeração por absorção de calor.  
Fonte: Benedetti, 2010.

Na Figura 7, é determinada a diferença e semelhança do sistema de refrigeração por absorção de calor e o de compressão de vapor. Sendo que o lado 1 é a diferenciação e o lado 2

a semelhança. É no gerador que será aproveitado o calor residual dos gases de exaustão dos motores.

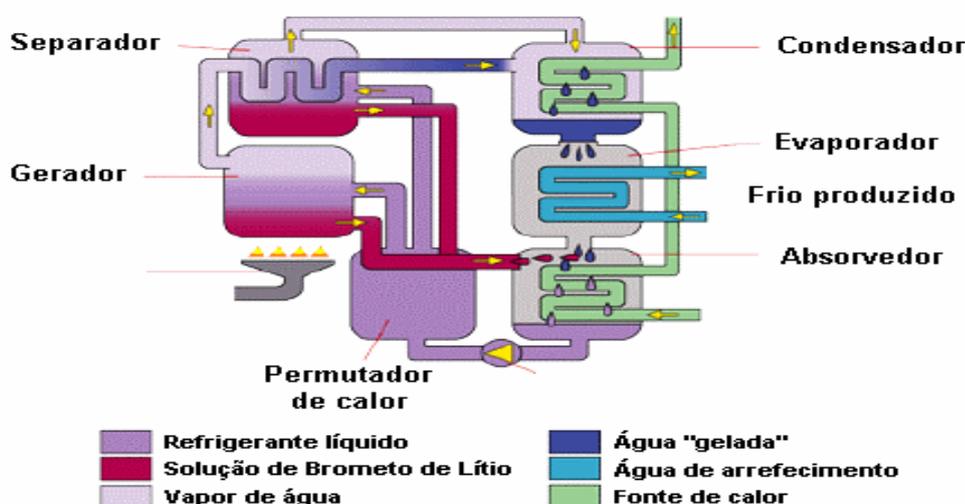


Figura 8 - Princípio básico de um sistema de refrigeração por absorção de calor de água-brometo de lítio.  
Fonte: Brandão, 2004.

Em função dos sistemas de refrigeração por absorção utilizarem o calor de processo como principal insumo e os sistemas de refrigeração por compressão utilizarem como único insumo a energia elétrica, os projetos de cogeração para uma central que necessite do fornecimento de refrigeração, tende a ter a preferência pelo *chillers* de absorção, em substituição dos sistemas à compressão, mesmo este apresentando COP maiores (BRASIL 2005, *apud* Fabres (2014)).

Segundo Brandão (2004) *apud* Fabres (2014), os *chillers* de absorção de calor possuem as seguintes vantagens quando comparado com os *chillers* de compressão tradicionais:

- Nível de consumo elétrico muito baixo.
- Baixos níveis de ruído e vibração.
- Não emite substâncias nocivas para a camada de ozônio.

Já Çengel e Boles (2006) apresentam as seguintes desvantagens dos sistemas a absorção em relação aos sistemas de compressão:

- Mais caros e menos eficientes.
- Mais complexos e necessitam de um espaço maior.

- Manutenção mais difícil, pois não são tão comuns.

As temperaturas de evaporação dos sistemas de absorção são fundamentais para determinar a temperatura mínima esperada do calor disponível que será utilizado no sistema. Além disso, a temperatura de evaporação também influencia na seleção da bomba e do dispositivo de expansão (MENNA, 2008).

De acordo com a fonte de calor e a temperatura desse calor, se pode propor qual será a aplicação do sistema de refrigeração em função da temperatura de evaporação que deve ser obtida. Para temperaturas de 0 °C, os sistemas de refrigeração são geralmente usados para climatização industrial e para se resfriar líquidos, e em algumas câmaras de produtos alimentícios. Para temperaturas de -10 °C, os sistemas serão utilizados para fabricação de gelo industrial, entre outros. Para regimes de temperaturas entre -15 e -20 °C, os sistemas serão utilizados em câmaras para produtos congelados estocados. Temperaturas de -25 °C são utilizadas em fabricação de sorvete. Para regimes de temperatura de -40 °C, são utilizados em túneis de congelamento de produtos alimentícios (COSTA, 2002 *apud* MENNA, 2008).

Para ser feita a escolha da fonte de calor, deve ser levado em conta a temperatura do calor disponível e a disponibilidade de calor. Logo, para o funcionamento de um sistema de absorção, o fluxo de calor deve ser manter constante para o fluido no gerador e a temperatura desse fluxo deve ser específica. A quantidade de calor necessária vai depender do tamanho do sistema de refrigeração e a temperatura do calor depende de como o calor é produzido (MENNA, 2008).

Na Tabela 4 está apresentada a relação entre a temperatura de evaporação e a temperatura mínima do calor disponível.

Tabela 4 - Temperatura de evaporação em relação a mínima temperatura do calor disponível para sistemas de refrigeração por absorção usando o par água-amônia.

Temperatura de evaporação [° C]	Temperatura mínima do calor disponível [° C]
0	107
-5	115
-10	120
-15	128
-20	137
-30	152
-35	162

Fonte: Mühler (2008) *apud* Menna (2008).

Estão apresentadas na Tabela 4 as temperaturas de evaporação e a temperatura mínima do calor disponível de um sistema de refrigeração por absorção que usa água-amônia. Será necessária uma temperatura mínima do calor utilizado no sistema para que a temperatura do evaporador permaneça constante. Portanto a temperatura do calor será um parâmetro que deve ser bem controlado.

## 2.5 Supermercados

A importância dos supermercados passou de 26% para 74% durante a década de 80 na distribuição dos gêneros alimentícios. Já na década de 90, o aumento foi lento e chegou a alcançar a marca de 85% (NIELSEN, 1997, *apud* CLEMENTE, 2003).

Os supermercados tiveram grande aumento na importância da distribuição dos alimentos ao longo das últimas décadas, porém, a margem de lucro sobre as vendas desse setor é relativamente baixa e vem sendo cada vez mais apertada pelo aumento da concorrência. Esse aumento da competição e a concentração de negócios, aumentam a busca por soluções de aumento de qualidade e diferenciação por parte dos supermercados. Os consumidores que exigem mais fazem com que esforços sejam voltados para que suas necessidades sejam atendidas (ROJO, 1998, *apud* CLEMENTE, 2003).

Os supermercados não estão apenas na principal zona comercial da cidade, sendo possível a instalação nas periferias e bairros mais afastados. O seu faturamento e contribuição financeira para as cidades é considerável quando comparada com outras atividades. São centros de compras de diversos produtos, como alimentação, lazer, limpeza e higiene pessoal. Suas dimensões quando comparado com outros tipos de comércio, são relativamente alto em função da necessidade da elevada gama de produtos e de estoques (ARRIGHI, *et al.* MENDES, 2006).

Segundo Parente (2000) *apud* Clemente (2003), existem diferentes tipos de varejo no setor alimentício e são divididos da seguinte forma: minimercados, lojas de conveniência, supermercados compactos, supermercados convencionais, superlojas, hipermercados e clubes atacadistas. Cada um com suas características e sua representatividade no setor.

O consumo energético em supermercados é bem elevado. Dentro do setor de serviços, é um dos que mais consomem energia, ficando na terceira posição dentre os edifícios com maior consumo energético por metro quadrado, podendo assim uma possível melhoria na eficiência energética. No supermercado, o consumo é de 320 kWh/m<sup>2</sup> (DGE, 2002, *apud* OLIVEIRA, 2012).

De acordo com DGE (2002) *apud* Oliveira (2012), existem três grandes grupos de consumidores de energia elétrica nos supermercados, sendo eles, a iluminação, a climatização e o sistema de refrigeração. A energia que esses três grupos consomem variam de acordo com a localização do supermercado e a eficiência dos equipamentos, entre outros motivos. Pode haver diferenças de 50% no valor de consumo de energia elétrica total em alguns casos, quando se compara o consumo de supermercados mais eficientes e menos eficientes. Na figura 9 tem-se o percentual de consumo de energia desses três grupos e dos outros.

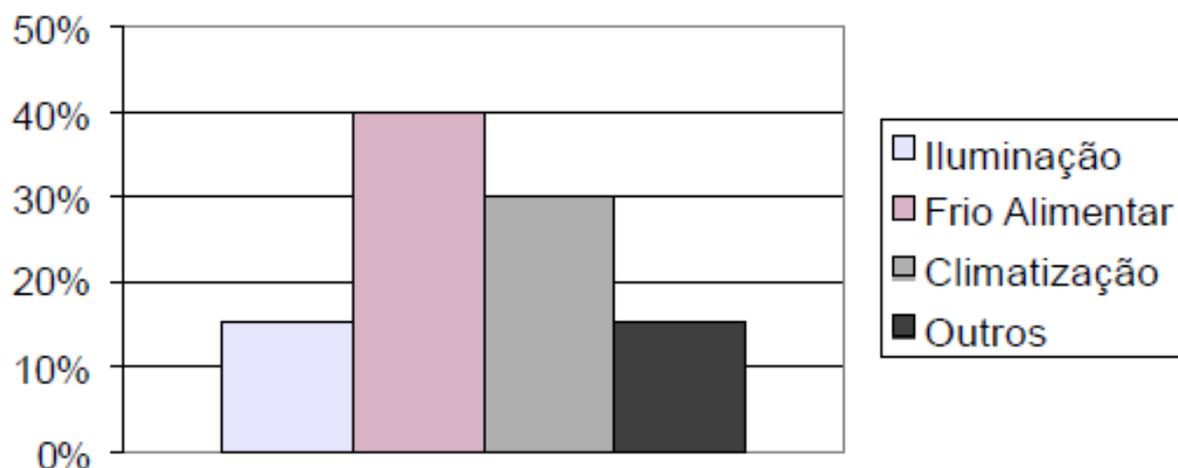


Figura 9 - Distribuição dos consumos de energia em um supermercado.  
Fonte: MARCHIORRO (2004), *apud* OLIVEIRA, (2012).

Na Figura 9 está representado o consumo de energia de acordo com a aplicação, podendo ser para a iluminação, para a conservação dos alimentos refrigerados, para a climatização e outras. Sendo que o gasto com iluminação, climatização e frio alimentar são os maiores gastos energético e que a soma deles se aproxima de 85%.

Nos supermercados é utilizada uma grande quantia de energia, principalmente, para manter os alimentos congelados e resfriados nos balcões expositores e na armazenagem dos frios, além do sistema de condicionamento de ar. A necessidade de manter os produtos perecíveis abaixo da temperatura ambiente é de fundamental importância para aumentar a durabilidade dos mesmos, podendo fazer o transporte e armazenagem em outros lugares (PORTILLA, 2010). O sistema de refrigeração consome aproximadamente 25% do consumo total e representa um dos maiores gastos de energia num supermercado (PANESSI, 2008, *apud* PORTILLA, 2010).

Existem basicamente dois sistemas de refrigeração principais em todo supermercado. O sistema chamado de baixa temperatura tem a finalidade de manter os produtos congelados e armazenados por longos períodos. As temperaturas de evaporação para esse sistema podem atingir até  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Já o outro, chamado de sistema de média temperatura, que pode atingir temperaturas de evaporação de aproximadamente  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , é usado para manter os produtos prontos para o consumo resfriados. Sua função é manter os produtos frescos e evitando assim que se estraguem (FISCHER, 2003, *apud* PORTILLA, 2010).

Se forem necessárias temperaturas mais baixas, pode se utilizar o sistema de cascata. Esse sistema pode atingir temperaturas de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nesse sistema de cascata, têm-se

dois sistemas funcionando de forma sequenciada. O primeiro de alta temperatura retira o calor rejeitado pelo condensador cascata ou trocado de calor intermediário. No outro sistema, de baixa temperatura, realiza-se o ciclo normal de expansão direta atingindo assim as temperaturas desejadas (LEE *et al.*, 2006, *apud* PORTILLA,2010).

## 2.6 Cogeração em Supermercados

A utilização de sistemas de cogeração no Brasil já é bem difundida em empresas do setor sucroalcooleiro e em alguns setores da indústria. Já no ramo supermercadista é uma tecnologia ainda pouco empregada. Entretanto este setor está começando a se interessar em propostas de sistemas que utilizam a cogeração em virtude de aumentar a eficiência, redução de custos e os valores estão sendo voltados para a sustentabilidade ambiental.

Os primeiros empreendimentos a implantarem projetos de cogeração são as grandes redes de supermercados, em função da alta competitividade entre elas, de possuírem um maior capital para investimento e uma maior necessidade de energia elétrica e térmica.

A rede de supermercados Sonda foi a primeira a utilizar sistemas de cogeração em seus estabelecimentos. Foram implantados geradores a gás natural em três estabelecimentos do grupo no estado de São Paulo, com geração de 1,56 MW de energia elétrica e 530 toneladas de refrigeração para o sistema de condicionamento de ar. O investimento necessário foi de R\$ 5 milhões e houve uma redução de 25% no consumo de energia elétrica (GAZETA MERCANTIL, 2005).

Segundo o Grupo Pão de Açúcar (2010), em seu relatório anual e de sustentabilidade foi estabelecido como meta para o ano de 2011 e os anos seguintes, a implantação de um sistema de cogeração a gás natural.

Este capítulo apresentou uma breve introdução sobre os temas base do trabalho por meio da revisão bibliográfica. Foram feitas revisão sobre o sistema energético brasileiro, a cogeração, os motores Diesel, os ciclos de refrigeração por absorção de calor e por último sobre supermercados. Esse estudo realizado será importante e servirá como apoio para estabelecer a viabilidade técnica de um sistema de cogeração proposto para as necessidades do estabelecimento analisado.

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo tem como finalidade descrever as características da pesquisa e demonstrar a sua natureza e classificação, a área da pesquisa, o método e os instrumentos de coleta de dados usados e também as variáveis e indicadores seguidos, para que seja possível análises e os cálculos necessários.

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

A pesquisa é uma maneira formal e ordenada de desenvolvimento do método científico e a qual possui um caráter pragmático. O seu objetivo fundamental é achar soluções para um problema, por meio do uso de procedimentos científicos (GIL, 1999).

Para Minayo (2003), uma pesquisa pode ser feita em função de dois métodos, o qualitativo e a quantitativo. O método qualitativo é fundamentado na interpretação e ocupa um lugar central na teoria, é constituído por um arsenal de técnicas que serão empregadas para levantar uma realidade. A pesquisa é uma atividade básica da ciência, e se relaciona com as ciências sociais sem a necessidade de ser quantificada, quando se trata de valores, significados, crenças, dentre outros construtos profundos de relações nos quais não se relacionam com abordagens de variáveis. Para o método qualitativo, são analisadas as características e cenários que são dificilmente apresentados por números. Deste modo, os dados devem ser coletados por meio de observação, descrição e gravação.

A pesquisa que utiliza o método quantitativo pode ser entendida como todo tipo de informação que tem a possibilidade de ser expressa por números obtidos por meios estatísticos e pelas opiniões e dados obtidos em função dos boletins de informação e pesquisa de campo (SILVA, 2001).

Segundo Gil (1999), a pesquisa pode ser classifica de três formas, a forma exploratória tem a finalidade de esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos e ainda proporcionar uma visão geral sobre determinado fato. Na forma descritiva se observa, analisa e descreve as características de determinada população ou fenômeno ou ainda estabelece relações entre variáveis, utilizando principalmente o método de coleta de dados. Por último, a

forma explicativa possibilita identificar fatores que determinam ou colaboram para a ocorrência de certos fenômenos, fazendo um aprofundamento do conhecimento da realidade, já que explica a o porquê e razão das coisas.

Em relação aos procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica fundamenta-se em livros e obras acadêmicas, tanto digitalizadas adquiridas via Internet quanto as impressas, ainda será baseada em dados obtidos por estudo de casos e experimentos. A pesquisa experimental é responsável pelos maiores avanços científicos, em função da manipulação de variáveis controladas adequadamente, com intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objetivo de pesquisa, utilizando técnicas especiais, além de equipamentos adequados.

A pesquisa através de documentos pode ser elaborada por meio de diversas fontes sem a necessidade de um tratamento analítico. Na pesquisa participante, é característico o envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas (FONSECA, 2002).

A pesquisa-ação é feita e concebida em função de bases empíricas com uma associação estreita com uma ação ou resolução de um problema, sendo que os pesquisadores e os participantes representativos de certa situação ou problema estejam cooperando ou participando para tal pesquisa.

Um estudo de caso pode ser entendido como um estudo aprofundado e difícil de um objeto ou mais, que possa fornecer um detalhado e largo conhecimento, com todo um planejamento, coleta e análise de dados como suporte (YIN, 2001).

A partir do que foi apresentado acima, este trabalho é considerado uma pesquisa quantitativa, em relação a abordagem da pesquisa, porque é utilizado dados numéricos, cálculos e análise estatístico, sem a utilização de dados obtidos por observação e interpretação. É uma pesquisa descritiva quanto ao objetivo, pelo motivo de que será estudado e analisado os ciclos Diesel e de refrigeração por absorção de calor, para ser feita uma descrição, registros e comparação dos resultados em função das eficiências quando se analisa as variáveis dos sistemas. O trabalho pode ainda ser caracterizado como uma pesquisa de cunho bibliográfico, pois utiliza e se baseia em uma gama de livros, teses, dissertações, artigos e o uso da internet, para o fim de desenvolver o estudo teórico e o estudo proposto.

A análise e avaliação dos parâmetros dos ciclos necessitam de um estudo de caso, no qual serão feitos uma observação e um melhor detalhamento para que o investigador consiga demonstrar seu ponto de vista sem interferir sobre o objeto a ser estudado.

### 3.2 Materiais e Métodos

Para este trabalho foi necessário um estudo bibliográfico para o fim de apresentar os ciclos e equipamentos a serem analisados, bem como procedimentos para o levantamento de dados do estabelecimento e dados do governo.

Em função do estudo realizado, foi elaborado o modelo do problema e com o equacionamento oriundo do estudo e utilização do *software* EXCEL, foram feitas o processamento dos dados e então analisados para chega a solução mais eficiente para o problema proposto. Enfim, foram apresentadas as conclusões e discutidas.

Na Figura 10 está mostrado o fluxograma das etapas para a realização do presente trabalho.

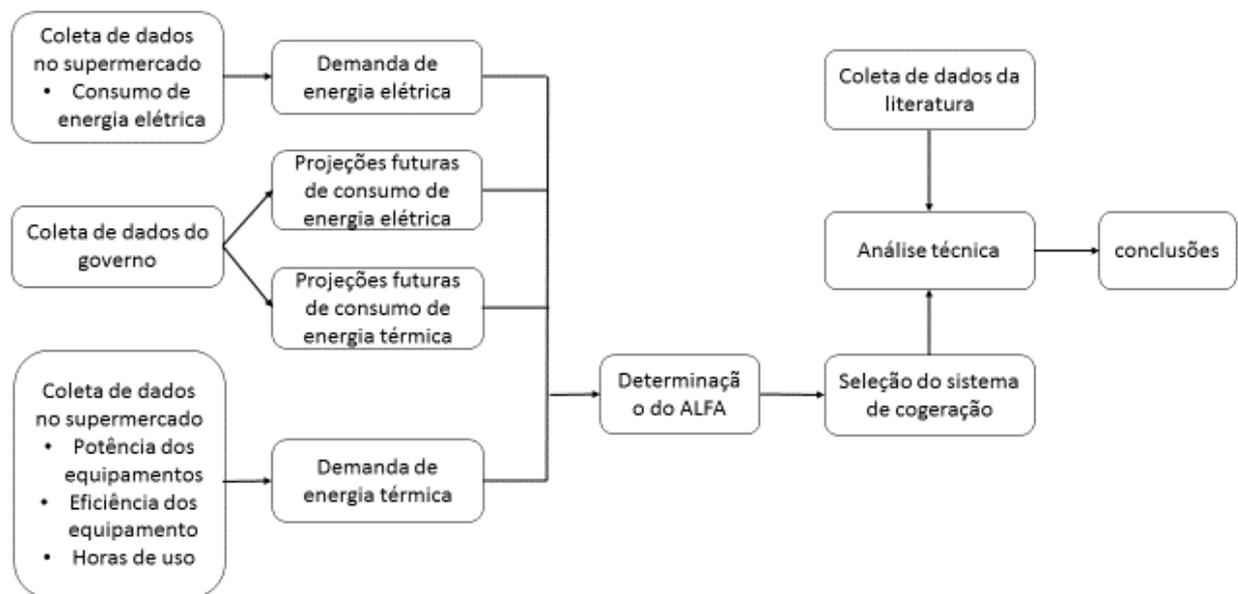


Figura 10 - Fluxograma das etapas realizadas.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

A Figura 10 representa o fluxograma das etapas realizadas para a realização deste trabalho. Inicialmente foram necessárias as coletas de dados do supermercado e do governo. Os dados coletados no supermercado foram necessários para a obtenção das demandas térmicas e elétricas, já os dados do governo foram úteis para se fazer projeções futuras das demandas de energia elétrica e térmica. Com isso, pode-se fazer a determinação do parâmetro ALFA, que é fundamental para se fazer a correta seleção do sistema de cogeração. Com o

sistema de cogeração determinado e juntamente com dados obtidos na literatura, pode-se fazer a análise técnica do sistema proposto e então chegar as conclusões do estudo realizado.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Uma variável pode ser entendida como qualquer coisa que possui classificação em duas ou mais categorias. É uma classificação ou medida, uma quantidade variável, um conceito operacional que demonstra ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação (GIL, 1999).

Na medição e estudo de cada variável, são selecionados alguns indicadores em função dos objetivos da pesquisa, podendo ser classificados de forma quantitativa ou qualitativa. Em função das definições demonstradas e dos objetivos do trabalho, são mostrados as variáveis e os seus indicadores na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis e Indicadores de Pesquisa.

Variáveis	Indicadores
Eficiência térmica do ciclo Diesel ( $\eta_l$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabalho líquido realizado pelo motor;</li> <li>• Energia térmica do combustível.</li> </ul>
Características Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de motor;</li> <li>• Tipo de <i>chillers</i> de absorção;</li> <li>• Energia térmica do combustível;</li> <li>• Variáveis operacionais de cada equipamento;</li> <li>• Custos Operacionais.</li> </ul>
Motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão de entrada;</li> <li>• Pressão de saída;</li> <li>• Temperatura de entrada;</li> <li>• Temperatura de saída;</li> <li>• Eficiência politrópica.</li> </ul>
Eficiência térmica do ciclo de cogeração ( $\eta_{cog}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia elétrica produzida;</li> <li>• Energia térmica recuperada;</li> <li>• Energia térmica do combustível;</li> </ul>

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

### **3.4 Instrumento de Coleta de Dados**

De acordo com o tema proposto foi feita a coleta de dados para se obter um embasamento fundamental para a pesquisa. Como a pesquisa tem caráter bibliográfico, quantitativo e descritivo, os dados necessários para o estudo foram obtidos por meio de pesquisa bibliográfica, utilizando livros, dissertações, teses e catálogos. Será feita uma observação direta para conseguir os dados teóricos e práticos por meio de um estudo de caso. O estudo de caso fornecerá informações para a realização de uma comparação entre os dados reais obtidos na teoria e os dados obtidos por modelagens matemáticas.

### **3.5 Tabulação de Dados**

A partir dos dados obtidos pela teoria, serão realizados cálculos no *software* EXCEL, que permite maior praticidade na resolução dos cálculos, melhor entendimento dos dados, e simulação dos ciclos propostos. O *software* EXCEL também será usado para gerar gráficos característicos do ciclo diesel, das demandas de energia do supermercado, e do ciclo de cogeração escolhido, promovendo assim o entendimento e interpretação dos resultados. Além disso, será empregado o *software* Microsoft Word para relatar e discutir os resultados obtidos.

### **3.6 Considerações Finais do Capítulo**

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas de forma a executar este trabalho. Abordaram-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além de ter delimitado a área em que ocorre esta pesquisa e também a forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, de acordo com a modelagem matemática realizada e a simulação no *software* EXCEL, e com os gráficos gerados pelo mesmo, além de mostrar quais foram os procedimentos adotados para a realização dos cálculos necessários a fim de obter os valores de eficiência térmica, e por fim será feita uma discussão dos resultados.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo tem a finalidade de mostrar os resultados da análise do sistema de cogeração aplicado a um supermercado no município de Aracruz – ES, aplicando as equações indicadas no capítulo 2. Assim, será apresentada a caracterização do estabelecimento, as demandas energéticas do estabelecimento, a proposição do projeto de cogeração e a análise técnica do sistema proposto.

### **4.1 Caracterização do Estabelecimento**

Para melhor entender o desempenho energético do estabelecimento, foi realizada uma pesquisa na qual foram coletados dados de consumo energético dos vários equipamentos do supermercado.

O supermercado em estudo é uma empresa de médio porte e está localizado no distrito de Jacupemba, no município de Aracruz – ES, onde possui clientes tanto da zona urbana quanto da zona rural. Durante a semana o fluxo de clientes é relativamente baixo, nas sextas-feiras e sábados esse fluxo aumenta. Na temporada da colheita de café as vendas se intensificam em função da região conter várias lavouras de café. O estabelecimento é associado à Central de Compras, a qual possui em torno de 80 lojas associadas, sendo a maioria no Estado do Espírito Santo. Esta associação promove promoções todas as semanas, o que atrai um grande número de clientes. Outra forma de sustentar seus clientes é a possibilidade do crédito.

Os horários de funcionamento do estabelecimento das segundas-feiras às sextas-feiras vão de 08:00 às 18:30, já nos sábados o horário é das 08:00 às 17:00. O estabelecimento não funciona nos domingos.

A concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica na localidade é a Escelsa EDP e a tensão fornecida para o estabelecimento é de 13.800 Volts. A energia elétrica é utilizada para o funcionamento dos equipamentos de refrigeração (ilhas, câmaras frias, freezers, geladeiras e ar condicionado), iluminação, ventiladores, computadores, impressoras, câmeras de vídeo, balanças, máquina moer e de fatiar, entre outros equipamentos. O

estabelecimento não possui sistema de climatização no ambiente da loja, apenas algumas salas e escritório são climatizados por meio de ar-condicionado.

Segundo Köppen e Geiger (2016), Aracruz possui clima tropical, classificado como Aw. A temperatura média é de 24,4°C e a pluviosidade média anual é de 1157 mm. É mostrado na Figura 11 e na Figura 12 o índice pluviométrico e a variação de temperatura durante o ano, respectivamente. A máxima temperatura atingida é no mês de fevereiro, sendo que a temperatura fica próxima de 32°C.

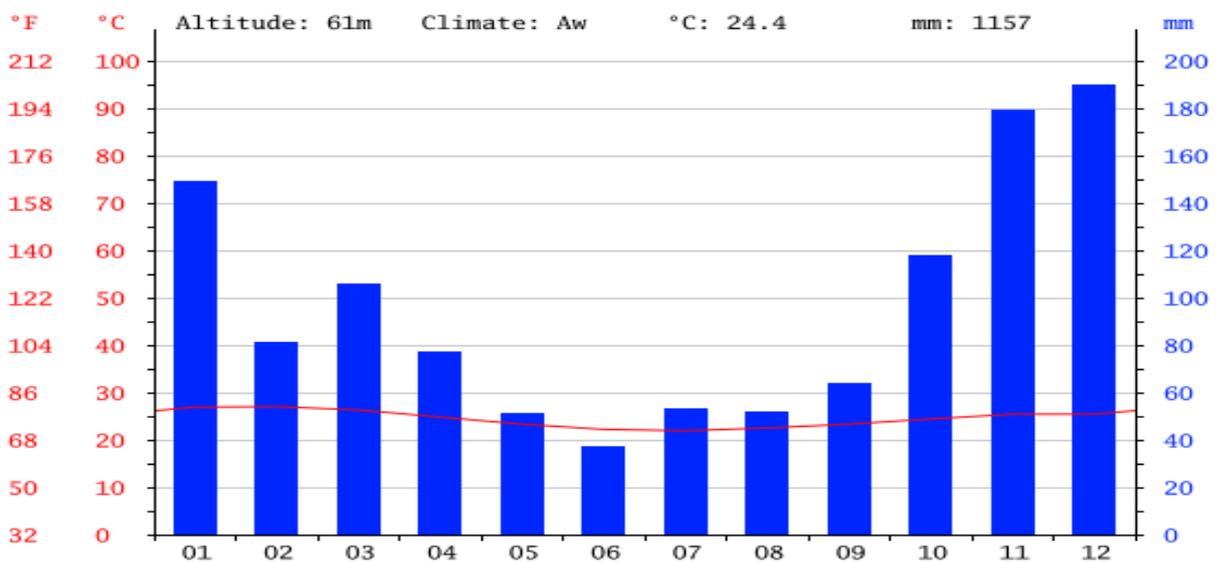


Figura 11 - Índice Pluviométrico anual de Aracruz – ES.  
Fonte: Köppen e Geiger, 2017 (adaptado de Climate.org).

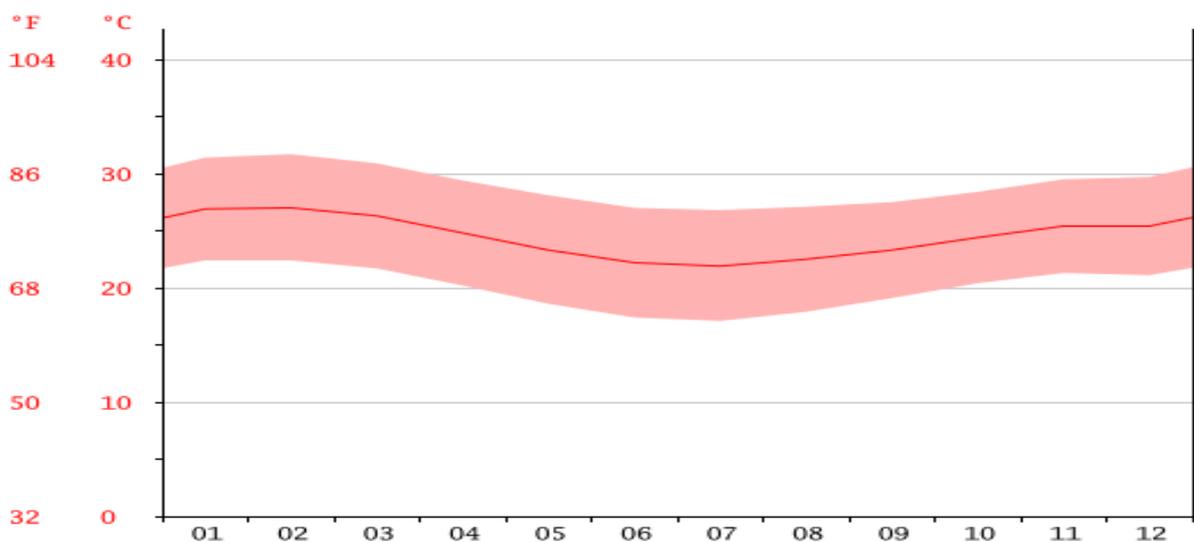


Figura 12 - Média de Temperaturas anual em Aracruz – ES.  
Fonte: Köppen e Geiger, 2017 (adaptado de Climate.org).

## 4.2 Análise da Demanda do Estabelecimento

O sistema de cogeração proposto será utilizado para geração de energia elétrica e fazer o aproveitamento do calor residual dos gases de escape por meio de um ciclo de refrigeração por absorção de calor. A energia térmica de frio poderá ser utilizada nos equipamentos de refrigeração e/ou ser utilizado para o funcionamento de um sistema de condicionamento do ambiente, já que o estabelecimento não contém.

A Figura 13 mostra o consumo de energia elétrica de setembro de 2014 até agosto de 2015.

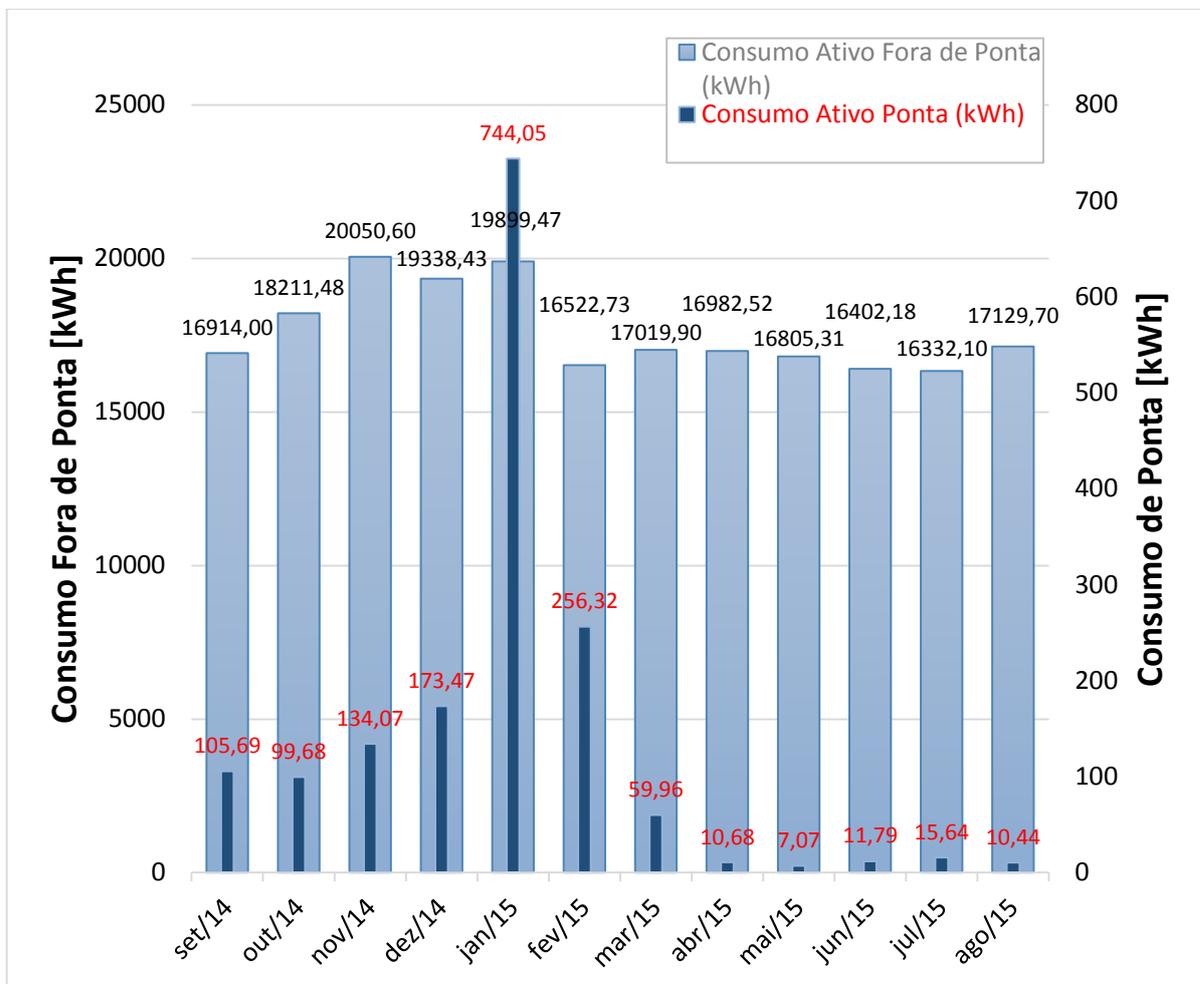


Figura 13 - Consumo elétrico do estabelecimento de setembro de 2014 até agosto de 2015.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Pela Figura 13 é perceptível verificar a sazonalidade causada pelas estações do ano, onde os meses correspondentes ao verão apresenta um maior consumo de energia elétrica pelo fato de ser necessária mais energia para manter os produtos congelados e condicionados corretamente. Com isso, foi selecionado o consumo do mês de janeiro de 2015 para ser usado como parâmetro para o dimensionamento do sistema de cogeração. De abril em diante, o consumo de ponta está relativamente baixo, devido a instalação de um gerador para operar nesse horário de ponta.

Já na Figura 14, é mostrado o gráfico da demanda referente a setembro de 2014 até agosto de 2015.

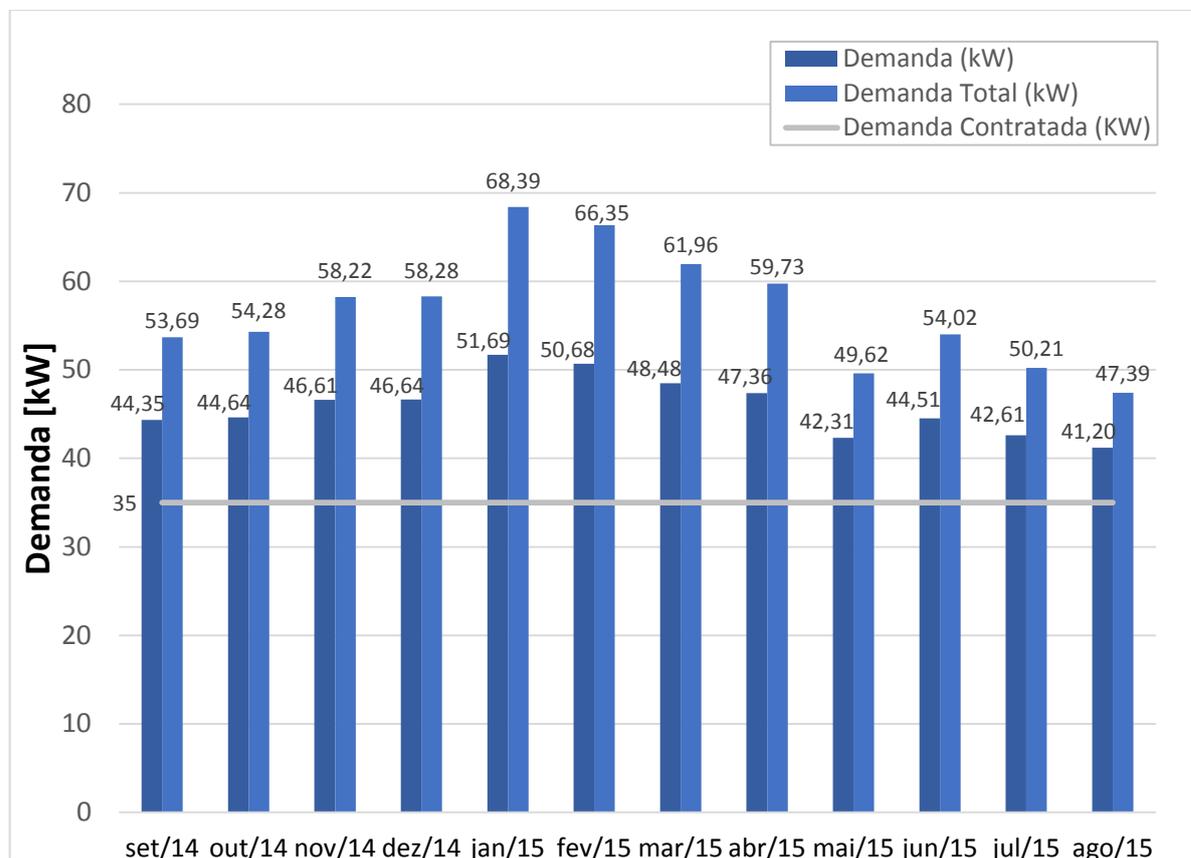


Figura 14 - Demanda elétrica do estabelecimento de setembro de 2014 até agosto de 2015.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Na Figura 14 está demonstrada a demanda, a demanda total e a demanda contratada. A demanda é a soma das cargas dos equipamentos que operam ao mesmo tempo. A demanda total é soma da demanda com a demanda ultrapassada. Logo, a demanda ultrapassada é a diferença da demanda total e a demanda. Analisando o gráfico, é de fácil verificação que o

valor da demanda ultrapassada está alto. É importante salientar que a tarifação da demanda ultrapassada é maior do que a tarifação da demanda. Com isso, é gerado um gasto adicional quando o limite da demanda é extrapolado. O valor da demanda contratada pelo estabelecimento é de 35,00 kW que está representada pela reta do gráfico.

Foi feito o levantamento de todos os equipamentos do supermercado para que seja possível comparar as demandas energéticas antes e depois da implantação de um sistema de cogeração. Os equipamentos estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Equipamentos do estabelecimento.

Equipamentos	Potência [W]	Qtd	Potência Total [W]	Média Ligado [h]	kWh/dia	%
BALANÇA HORTIFRUTI	2	1	2	11	0,022	0,02
EMPACOTADOR A VÁCUO	80	2	160	0,3	0,048	0,03
IMPRESSORAS	400	2	800	0,15	0,12	0,08
BALANÇA ACOUGUE	10	2	20	11	0,22	0,15
MAQUINA DE FATIAR	800	1	800	0,3	0,24	0,17
MAQUINA BATER BIFE	600	1	600	0,5	0,3	0,21
VENTILADOR RECEPCAO	70	1	70	5	0,35	0,24
VENTILADOR FINANCEIRO	90	1	90	5	0,45	0,31
MAQUINA DE MOER	2.000	1	2.000	0,3	0,6	0,41
VENTILADOR ACOUGUE	70	1	70	10	0,7	0,48
EMBALADOR VACUO	746	1	746	1	0,746	0,52
BEBEDOURO	70	1	70	14	0,98	0,68
TV RECEPCAO	100	1	100	11	1,1	0,76
CAMERAS DE VIDEO	2	24	48	24	1,152	0,80
DVR + MONITOR	110	1	110	11	1,21	0,84
GELADEIRA COZINHA	120	1	120	14	1,68	1,16
FREEZER POLPA FRUTAS	150	1	150	14	2,1	1,45
GELADEIRA REFRIGERANTE	150	1	150	14	2,1	1,45
GELADEIRA KIBOM	170	1	170	14	2,38	1,65
NOTEBOOKS	100	3	300	11	3,3	2,28
AR CONDICIONADO 1	1.187	1	1.187	8	9,496	6,56
AR CONDICIONADO 2	820	2	1.640	8	13,12	9,07
DESKTOPS	400	4	1.600	11	17,6	12,17
SERVIDOR POWEREDGE	800	1	800	24	19,2	13,27
LAMPADAS	40	70	2.800	11	30,8	21,29
CHECKOUTS COMPLETOS	450	7	3.150	11	34,65	23,95
<b>TOTAL</b>			<b>17.753</b>		<b>144,66</b>	<b>100</b>

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Na Tabela 6 está o inventário dos equipamentos do supermercado, com exceção das unidades condensadoras, compressores e equipamentos auxiliares. É possível verificar na tabela, a quantidade de energia gasta em um dia de intenso movimento no estabelecimento. Também pode ser verificado a importância de cada equipamento no gasto total de energia. Sendo que o *checkouts*, iluminação e o servidor possuem um alto consumo de energia. Tem-se que a soma das potências é de 17,75 kW e a são consumidos 144,66 kWh para o funcionamento desses equipamentos.

Já na Tabela 7 estão demonstrados os equipamentos de refrigeração das câmaras frias, expositores e ilhas do supermercado em estudo.

Tabela 7 – Equipamentos do estabelecimento.

EQUIPAMENTO	MODELO	COMPRESSOR	REFRIGERANTE	POTÊNCIA CONSUMIDA (kW)	CAPACIDADE FRIGORÍFICA (kcal/h)	kcal/dia
CAMARA 1	FRM300H2C-B	CR34K6M-TF5	R22	2,97	9100	163800
CAMARA 2	FRM300H2C-B	CR34K6M-TF5	R22	2,97	9100	163800
CAMARA 3	FRM600H2C-B	CR62KQM-TF5	HP81	2,85	4128	82560
CAMARA 4	-	MT64HM3DVE	R22	5,1	10876	108763
EXPOSITOR 1	FLEX250H2C	CR28K6-TF5-525	R22	2,58	6950	125100
EXPOSITOR 2	FLEX500H2C	CR53KQM-TF5-202	R22	4,07	11430	205740
EXPOSITOR 3	VEGA 125 LX G5	TCM2062E	R22	1,04	1800	32400
EXPOSITOR 4	FLEX150X6C	RS70C1E-TFC-231	R404A	1,14	2360	42480
ILHA 1	FLEX450H2C-D	CR47KQM-TF5-202	HP81	2,16	3247	64940
ILHA 2	FLEX450H2C-05D	CR47KQM-TF5-202	HP81	2,16	3247	64940
ILHA 3	FLEX600H2C-C	CR62KQM-TF5-202	HP81	2,85	4128	82560
<b>TOTAL</b>				<b>29,89</b>	<b>66366,32</b>	<b>1137083</b>

Fonte: Pesquisa Direta (2017); Heatcraft (2017); Danfoss (2017); Elgin (2017).

É possível verificar através da Tabela 7 várias informações dos equipamentos de refrigeração do estabelecimento. Como o modelo, o compressor utilizado, o gás refrigerante do sistema, as potências unitária e total, capacidades frigorífica unitária e total, além da energia térmica total necessária em um dia. Somando-se os valores dos equipamentos de refrigeração, tem-se que a potência total desses equipamentos é de 29,89 kW e a capacidade frigorífica total é de 66.366,32 kcal/h e 1.137.083,00 kcal/dia.

Além dos compressores, os sistemas de refrigeração necessitam de outros equipamentos, como o evaporador e o condensador. Nos condensadores e evaporadores são

necessários ventiladores para aumentar a troca térmica. Na Tabela 8 estão demonstrados alguns dados dos ventiladores dos evaporadores e condensadores.

Tabela 8 – Ventiladores dos evaporadores e condensadores.

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA VENTILADOR CONDENSADOR (kW)	POTÊNCIA VENTILADOR EVAPORADOR (kW)	MÉDIA LIGADO (h)	kWh/dia
CAMARA 1	0,73	0,62	18	24,16
CAMARA 2	0,73	0,62	18	24,16
CAMARA 3	0,73	0,92	20	33,00
CAMARA 4	-	0,15	10	1,50
EXPOSITOR 1	0,40	0,15	18	9,83
EXPOSITOR 2	0,57	0,36	18	16,78
EXPOSITOR 3	-	0,10	18	1,80
EXPOSITOR 4	0,13	0,10	18	4,14
ILHA 1	0,59	0,15	20	14,88
ILHA 2	0,59	0,15	20	14,88
ILHA 3	0,59	0,40	20	19,88
<b>TOTAL</b>	<b>5,06</b>	<b>3,72</b>		<b>165,00</b>

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

É possível verificar que a potência total de todos os ventiladores é de 8,78 kW e levando em conta o tempo de funcionamento de cada um (média ligado), são gastos 165 kWh/dia na utilização desses ventiladores. Não foi possível a coleta de dados dos ventiladores da câmara 4 e do expositor 3 por falta de equipamento e de placas de identificação dos ventiladores. Vale ressaltar que alguns evaporadores possuem mais de 1 ventilador e que a potência descrita acima é a soma das potências unitárias. Já nos condensadores, é necessário apenas 1 ventilador.

A câmara 3 possui um sistema de degelo que conta com uma resistência de 3,41 kW, que funciona em média 2 horas por dia. Com isso, são necessários 6,82 kWh/dia.

A potência elétrica total será o somatório das potências de todos os equipamentos. Com isso, a potência elétrica total é de 59,83 kW.

#### 4.2.1 Cálculo da demanda térmica futura

Como o supermercado não possui sistema de condicionamento de ar, será necessário o cálculo da carga térmica para o correto dimensionamento do sistema de cogeração. Para esse cálculo, foi utilizada uma planilha do software EXCEL disponibilizada pelo Laboratório de Conforto e Eficiência Energética (LABCEE), da Universidade Federal de Pelotas. Para este cálculo, é considerada a orientação do estabelecimento, a quantidade de janelas e portas do ambiente, a quantidade de pessoas e equipamentos que se encontram dentro do ambiente, o tipo do teto, entre outros. A planilha detalhada se encontra no Anexo I. A carga térmica de frio total, correspondente ao condicionamento do ambiente, é de 225,08 kW.

#### 4.2.2 Considerações finais sobre a demanda do estabelecimento

Para propor um sistema de cogeração, é indicado a análise do parâmetro ALFA, que é calculado fazendo a divisão da potência elétrica pela potência térmica. Com isso, o ALFA resultante é de 0,2658. Fazendo o inverso do ALFA, o valor é 3,76.

Para o BETA, que é baseado nas projeções futuras, utilizou-se uma taxa de crescimento de 1,5% no consumo energético por ano. No final do vigésimo ano, que corresponde ao tempo de vida do projeto de cogeração, tem-se que o consumo elétrico será de 79,38 kW<sub>e</sub>. Com isso, o beta calculado é de 2,83.

O sistema proposto deve funcionar em paridade térmica para suprir as necessidades térmicas. Portanto, a energia elétrica será um subproduto do sistema de cogeração.

Apesar de o parâmetro ALFA indicar a utilização de turbina a vapor, será proposto sistemas que utilizam microturbinas a gás e motores de combustão interna, já que se trata de um estabelecimento de pequeno porte e de que o estabelecimento já possui um sistema de geração de energia elétrica por meio de motor de combustão interna para situações de falha no fornecimento de energia.

Em relação ao fornecimento de energia térmica, será proposta a utilização de *chillers* de compressão e *chillers* de absorção de calor, para ser possível comparar esses sistemas e escolher o melhor sistema.

### 4.3 Sistema de cogeração proposto

O sistema proposto está demonstrado na Figura 15, o qual é composto por um motor de combustão interna e um sistema de refrigeração por absorção.

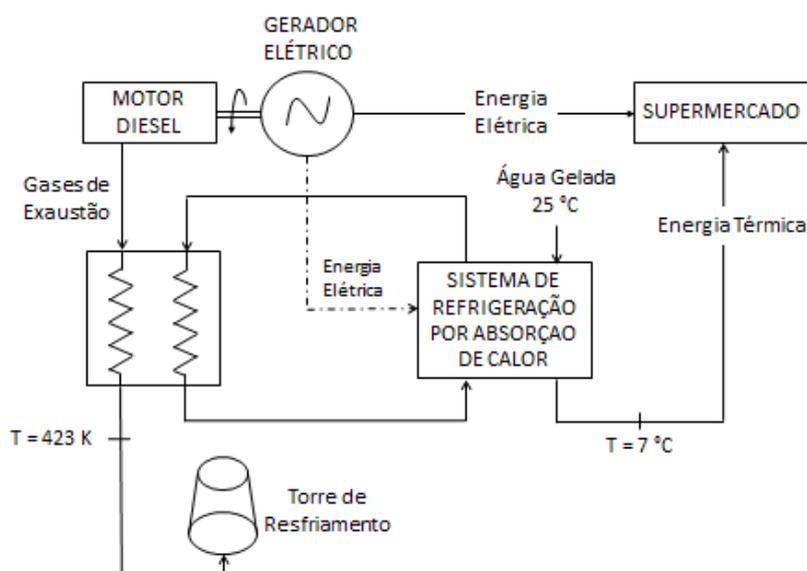


Figura 15 - Desenho esquemático da configuração proposta com a utilização de motores de combustão interna.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Pode ser verificado através da Figura 15 que o sistema proposto utiliza um motor de combustão interna e que emprega o óleo diesel como combustível. Ele fornecerá potência mecânica a um gerador elétrico, o qual fornecerá energia elétrica ao estabelecimento e ao sistema de refrigeração por absorção. Através dos gases de exaustão, o mesmo motor fornecerá energia térmica para um trocador de calor, o qual vai alimentar um sistema de refrigeração por absorção, posteriormente, os gases de exaustão sairão por uma chaminé (torre de resfriamento). Os gases de exaustão chegarão à chaminé na temperatura de  $149,85 \text{ °C}$  ( $423 \text{ K}$ ). O *chiller* fornecerá água gelada a uma temperatura de  $7 \text{ °C}$  para o condicionamento do supermercado.

O sistema que fornece energia térmica para o *chiller* e conseqüentemente energia elétrica deverá funcionar durante o horário em que o estabelecimento estiver aberto. Com isso, em caso de excedente de energia elétrica produzida, essa poderá ser inserida na rede de distribuição e ser utilizada no período em que o estabelecimento estiver fechado, o qual corresponde ao horário em que o sistema de condicionamento do ambiente não funcionará.

### 4.3.1 Equipamentos selecionados na configuração 1

Com a demanda de energia térmica de condicionamento do ambiente no patamar de 225,08 kW, levando em conta o COP das máquinas, dois sistemas de refrigeração por absorção foram selecionados. De acordo com a Tabela 9, têm-se as especificações desses equipamentos.

Tabela 9 – Dados dos catálogos dos sistemas de refrigeração por absorção.

Modelo	Thermax ED 10B HU/CU	LG WCDN Series 007
Calor Necessário (kW)	209	184
Capacidade Frigorífica (kW)	264	246
COP	1,26	1,34
Vazão de Água Gelada (m <sup>3</sup> /h)	45,2	30,3
Temperatura de entrada dos gases de exaustão (°C)	275 - 600	350
Temperatura de saída dos gases de exaustão (°C)	170 - 200	165
Temperatura de saída da água gelada (°C)	12,0 - 7,0	12,0 - 7,0
Consumo Energia Elétrica (kW)	7,125	2,54

Fonte: Thermax (2017); LG (2017); Pesquisa direta (2017).

Para o sistema de refrigeração por absorção, têm-se duas possibilidades, sendo que irão funcionar no modo de operação nominal. Observa-se que o consumo energético do *chiller* da marca Thermax é superior que o *chiller* da marca LG. Esse consumo energético deve ser somado a demanda de energia elétrica do estabelecimento. A necessidade térmica de calor será suprida por motores de combustão interna.

Na Figura 16, têm-se os *chillers* de absorção selecionados.

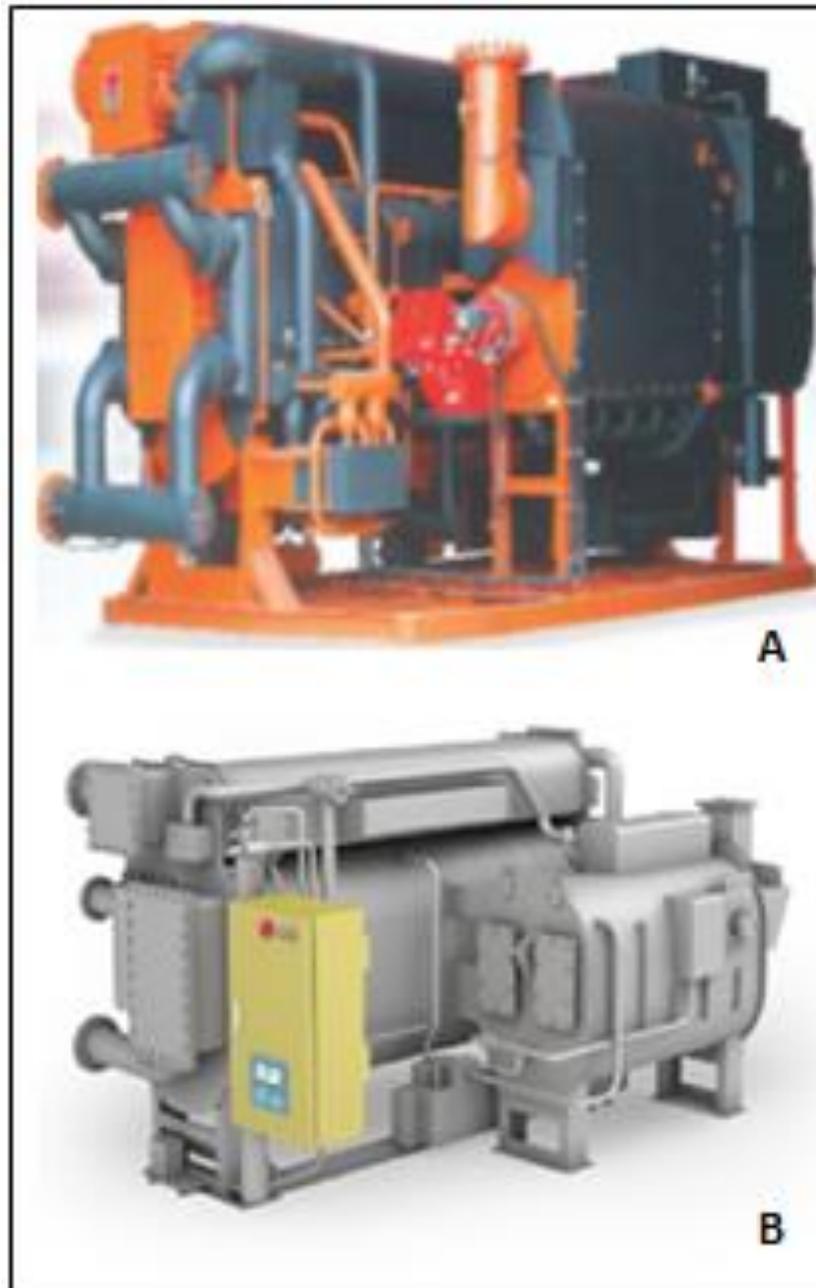


Figura 16 - *Chillers* de absorção de calor. O *chiller* da marca Thermax é o A. Já o *chiller* da marca LG é o B.  
Fonte: Thermax (2017); LG (2017).

Na Figura 16, o *chiller* da esquerda pertence ao fabricante Thermax, já o *chiller* da direita é fabricado pela LG.

Posteriormente a escolha do *chillers*, foi analisada a escolha de dois motogeradores para compor o sistema de cogeração. A Tabela 10 demonstra alguns parâmetros e especificações dos motores de combustão interna selecionados.

Tabela 10 – Dados dos motores de combustão interna selecionados

INFORMAÇÕES SOBRE MOTOGERADOR			
ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR			
MODELO		WEG - LINHA AG10 - 250SI20AI	WEG - LINHA AG10 - 250SI20AI
Potência máxima gerada	kWe	326,53	319,13
Frequência	Hz	60	60
Velocidade	RPM	1800	1800
Eficiência	%	0,925	0,925
ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR			
Modelo		VOLVO PENTA TAD1343GE	VOLVO PENTA TAD1342GE
Potência máxima	kW	353	345
Combustível	-	Diesel	Diesel
PCI do combustível	kJ/kg	43200	43200
Fluxo mássico de combustível (g/kWh)	Carga	-	-
	25%	236	237
	50%	206	207
	75%	200	200
	100%	200	201
Vazão Mássica de combustível	kg/s	0,0196	0,0193
Vazão volumétrica de ar	m³/s	0,4667	0,4783
Vazão Mássica de ar	kg/s	0,551	0,565
Razão ar-combustível		28,099	29,323
Potência Térmica	kW	-	-
Diâmetro do cilindro	m	0,131	0,131
Curso	m	0,158	0,158
Número de cilindros	-	6	6
Cilindrada	cm³	12780	12780
Taxa de compressão	-	18,1 : 1	18,1 : 1
Eficiência na carga total	%	47,0	47,0
Fluxo dos Gases de Exaustão	m³/s	1,10	1,08
Temperatura dos gases de exaustão do motor	°C	446	423

Fonte: VOLVO PENTA (2017); WEG (2017); Pesquisa Direta (2017).

De acordo com a Tabela 10, os MCI utilizam óleo diesel como combustível, o qual foi adotado o PCI de 43.200 kJ/kg. Os motores geram 326,53 kW e 319,13 kW de energia elétrica. O motor TAD1343GE é capaz de operar o *chiller* da LG em sua carga máxima, já o TAD1342GE não possui potência térmica suficiente para a carga máxima.

Na Figura 17 é mostrado o motor de combustão interna selecionado.



Figura 17 - Motor de combustão interna da VOLVO PENTA, modelos TAD1342GE e TAD1343GE.  
Fonte: VOLVO PENTA (2017).

Na Figura 17 tem-se a figura do motor do modelo TAD1342GE e TAD1343GE. O modelo é o mesmo para os dois, a única diferença é o consumo de combustível e potência gerada, onde o TAD1343 consome uma maior quantidade de combustível. Logo, gera uma maior potência mecânica.

Foram determinados quatro cenários característicos para o sistema de cogeração a partir dos motogeradores. Para o motor VOLVO PENTA TAD1342GE, adotou-se o panorama 1 utilizando o *chiller* da *Thermax* e o panorama 2 utilizando o *chiller* da LG.

Para o motor VOLVO PENTA TAD1343GE, foi adotado o panorama 3 utilizando o *chiller* da *Thermax* e o panorama 4 utilizando o *chiller* da LG

#### 4.3.2 Equipamentos selecionados na configuração 2

Nesta configuração, serão utilizados chillers de compressão de vapor em vez de chillers de absorção. Com isso, será feita a comparação entre a aplicação desses equipamentos. De acordo com a Figura 16, tem-se o desenho esquemático da configuração 2.

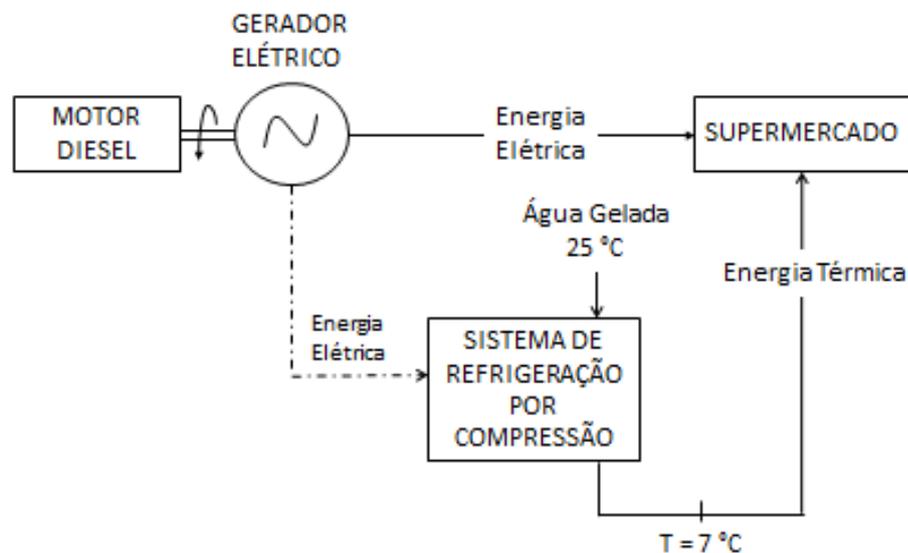


Figura 18 - Desenho esquemático da configuração 2.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Diferente da configuração anterior, o calor resultante dos gases de exaustão não serão utilizados. Os chillers serão alimentados com a energia elétrica gerada no motogerador. Na Tabela 11, está demonstrado alguns dados dos *chillers* de compressão.

Tabela 11 – Parâmetros dos *chillers* de compressão.

Modelo	Carrier 30RA-75	HITACHI chiller scroll inverter 75TR
Capacidade Frigorífica (kW)	244,77	253,92
COP	2,70	2,96
Refrigerante	R-407	R-410A
Vazão de Água Gelada (m <sup>3</sup> /h)	0,042	0,03972
Temperatura de saída da água gelada (°C)	5	6,7
Consumo de energia elétrica (kWe)	90,70	85,78

Fonte: CARRIER (2017); HITACHI (2017); Pesquisa Direta (2017).

Pela Tabela 11, é possível verificar que os chillers não trabalharão nas suas capacidades máximas, já que são necessários 225,08 kW de frio para condicionamento. O *chiller* da CARRIER 30RA-75 possui COP de 2,7, utiliza o R-407 como fluido refrigerante e sua capacidade máxima de refrigeração é de 244,77 kW. Já o *chiller* da HITACHI possui COP de 2,96, utiliza o R-410A como refrigerante e sua capacidade total de refrigeração é de 253,92 kW. Na Figura 19, têm-se as imagens dos *chillers* de compressão utilizados.



Figura 19 - A esquerda tem-se o *chiller* da marca HITACHI. Já o *chiller* da direita é da marca CARRIER.  
Fonte: CARRIER (2017); HITACHI (2017).

Na Figura 20, tem-se a imagem do motor utilizado.

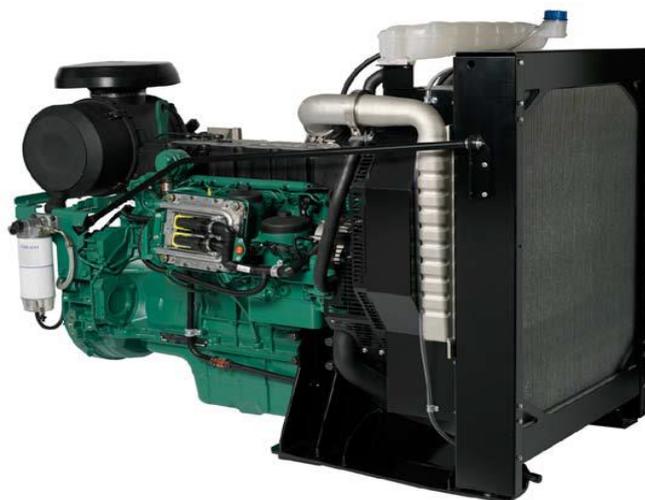


Figura 20 - Motor de combustão interna da VOLVO PENTA, modelo TAD734GE.  
Fonte: VOLVO PENTA (2017).

Na Tabela 12, têm-se os dados do motor utilizado na segunda configuração.

Tabela 12 – Dados dos motores de combustão interna da configuração 2.

INFORMAÇÕES SOBRE MOTOGERADOR		
ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR		
MODELO		WEG - LINHA AG10 -250SI20AI
Potência máxima gerada	kWe	203,5
Frequência	Hz	60
Velocidade	RPM	1800
Eficiência	%	0,925
ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR		
MODELO		VOLVO PENTA TAD734GE
Potência máxima	kW	220
Combustível	-	Diesel
PCI do combustível	kJ/kg	43200
Fluxo mássico de combustível (g/kWh)	Carga	-
	25%	257
	50%	237
	75%	222
	100%	205
Vazão Mássica de combustível	kg/s	0,0125
Vazão volumétrica de ar	m <sup>3</sup> /s	0,305
Vazão Mássica de ar	kg/s	0,360
Razão ar-combustível		28,749
Potência Térmica	kW	174
Diâmetro do cilindro	m	0,108
Curso	m	0,13
Número de cilindros	-	6
Cilindrada	cm <sup>3</sup>	7150
Taxa de compressão	-	17:1
Eficiência na carga total	%	46,0
Fluxo dos Gases de Exaustão	m <sup>3</sup> /s	0,61
Temperatura dos gases de exustão do motor	°C	475

Fonte: VOLVO PENTA (2017); WEG (2017); Pesquisa Direta (2017).

O modelo da configuração 2 possui uma menor potência que os motores da configuração 1. Isso se deve ao fato de que na configuração 2 será utilizado apenas energia elétrica para o funcionamento do *chiller* de compressão e este modelo é suficiente para fornecer as necessidades elétricas do sistema de condicionamento de ar e do estabelecimento.

Na configuração 2, utilizou-se o motogerador TAD734GE associado aos *chillers*. O panorama 5 utilizou-se o *chiller* do fabricante CARRIER e o panorama 6 utilizou-se o *chiller* do fabricante HITACHI.

#### 4.3.3 Equipamentos selecionados na configuração 3

Nesta configuração, a energia elétrica e térmica será produzida por microturbina. Na primeira configuração, energia elétrica e térmica é produzida por motores de combustão interna. Na Figura 21, está o esquema da configuração 3.

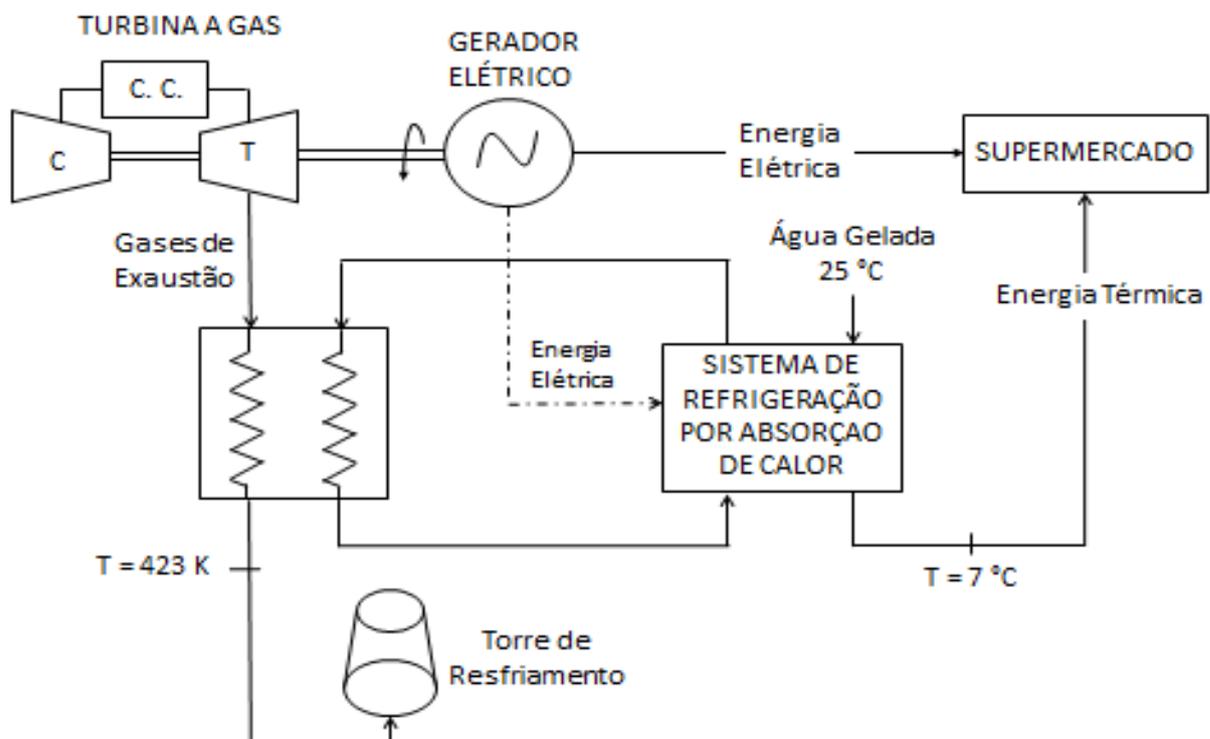


Figura 21 - Desenho esquemático da configuração 3.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Nesta configuração, a microturbina irá fornecer energia mecânica para o gerador e energia térmica para o *chillers* de absorção. O gerador elétrico irá fornecer energia elétrica para o estabelecimento e para o *chiller*.

Os dados e figuras dos *chillers* de absorção utilizados nesta configuração são fornecidos na configuração 1.

Já os dados da microturbina a gás, estão demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Dados da turbina a gás utilizado na configuração 3.

INFORMAÇÕES SOBRE A MICROTURBINA	
Modelo	Capstone C200
Características do equipamento	
RPM	61000
Frequência (Hz)	60
Combustível	Metano
Potência Térmica - combustível (kW)	581,59
Vazão mássica de combustível (kg/s)	0,01163
Vazão dos gases de exaustão (kg/s)	1,297
Vazão de ar (kg/s)	1,285
Razão combustível-ar (FAR)	0,009
Eficiência elétrica (%)	31,5
Potência Elétrica (kW)	183,2
Outros aspectos	
Temperatura de exaustão (°C)	300,65
Ruído	65 dBA - 10 metros
Peso (kg)	2775

Fonte: CAPSTONE (2017); Pesquisa Direta (2017).

A microturbina utilizada é do fabricante CAPSTONE, o modelo é o C200. Ela irá operar na frequência de 60 Hz, com rotação de 60.000 RPM. Sua eficiência elétrica é de 31,5%. A capacidade de geração de energia elétrica é de 200 kW. Porém, em função da localização do estabelecimento e da temperatura local, a potência elétrica máxima gerada é de 183,2 kW. O consumo de combustível é de 0,01163 kg/s.

Na Figura 22, tem-se a imagem da microturbina CAPSTONE C200 utilizada.



Figura 22 - Microturbina CAPSTONE C200.  
Fonte: CAPSTONE (2017).

Com isso, estabeleceu-se mais 2 panoramas com a utilização da microturbina CAPSTONE C200. O panorama 7 utilizando o *chiller* do fabricante Thermax e o panorama 8 utilizando o *chiller* da fabricante LG.

#### 4.3.4 Equipamentos selecionados na configuração 4

A configuração 4 é composta por uma microturbina e *chillers* de compressão. Na Figura 23 está demonstrado o esquema dessa configuração.

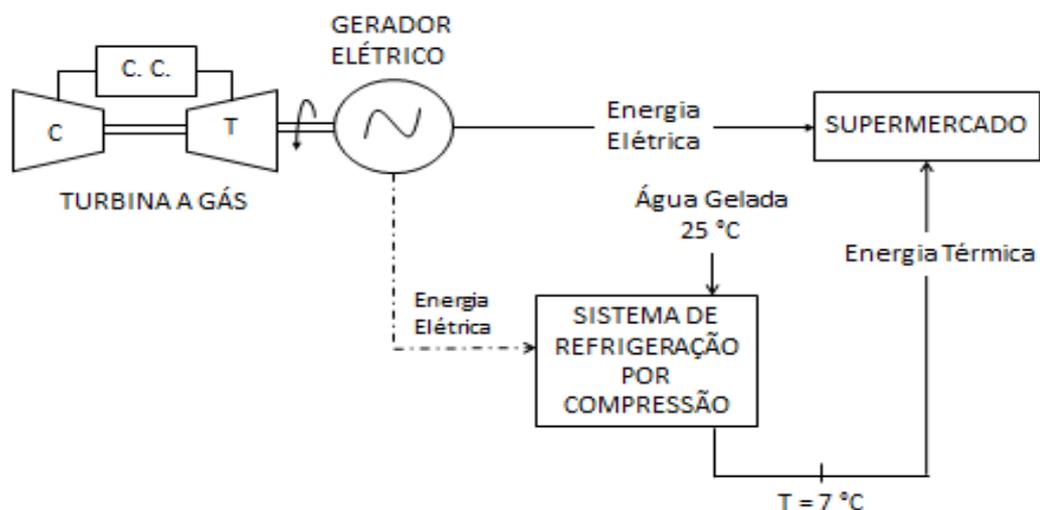


Figura 23 - Desenho esquemático da configuração 4.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Pela Figura 23, é possível verificar que a microturbina fornecerá energia mecânica para o gerador. Com isso o gerador elétrico irá fornecer energia elétrica tanto para os equipamentos do supermercado quanto para o sistema de refrigeração por compressão.

Os dados e figura da microturbina são fornecidos na configuração 3 e os dados e figuras dos *chillers* de compressão estão fornecidos na configuração 2.

A partir da configuração 4 são fornecidos mais 2 panoramas utilizando a microturbina. O panorama 9 com o *chiller* do fabricante CARRIER e o panorama 10 utilizando o *chiller* do fabricante HITACHI.

#### 4.3.5 Resumo da análise energética dos equipamentos selecionados

Com todas as configurações e panoramas estabelecidos. Foi realizada a análise energética dos equipamentos utilizados. Para isso, utilizaram-se as equações do ciclo Diesel, ciclo Brayton, ciclo de refrigeração por compressão e de absorção de calor. As equações estão demonstradas no capítulo 2.

Com isso, na Tabela 14, tem-se um resumo dos parâmetros de funcionamento dos *chillers* de absorção escolhidos.

Tabela 14 – Parâmetros dos *chillers* de absorção de calor.

FLUXO ENERGÉTICO NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO			
Demanda térmica de água gelada	kW	225,08	
Fabricante	-	Thermax ED 10B HU/CU	LG WCDN Series 007
Potência térmica necessária	kW	178,19	167,97
Demanda elétrica total do supermercado	kW	66,95	62,37

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

De acordo com a tabela 14, pode-se perceber que o equipamento da LG necessita de uma demanda térmica menor que a do outro equipamento. Isso também é válido para a

demanda elétrica total do estabelecimento. Com a utilização do equipamento da LG, essa demanda é também menor.

Já na Tabela 15, têm-se os parâmetros dos *chillers* de compressão utilizados.

Tabela 15 – Parâmetros dos *chillers* de compressão.

FLUXO ENERGÉTICO NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO			
Demanda térmica de água gelada	kW	225,08	
Sistema	-	Carrier 30RA - 75	HITACHI <i>chiller</i> scroll inverter 75 TR
Potência elétrica do compressor	kW	83,403	76,041
Demanda elétrica do <i>chiller</i>	kW	90,70	85,78
Demanda elétrica total do supermercado	kW	150,53	145,61

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Em função dos *chillers* de compressão utilizar energia elétrica para o seu funcionamento, a demanda elétrica total do estabelecimento será maior que utilizando os equipamentos de absorção. Isso pode ser verificado através da análise da Tabela 14 e 15. Analisando somente a Tabela 15, conclui-se que o equipamento da Carrier possui um maior consumo de energia elétrica do que o equipamento da HITACHI. Isso ocorre em função do *chiller* da HITACHI possuir um maior COP, já que a demanda térmica de frio é igual para os dois.

Com os parâmetros dos equipamentos de refrigeração demonstrados acima, é necessário demonstrar os parâmetros dos motores e turbina. Na tabela 16, tem-se o resumo da análise energética dos motores de combustão interna e da potência térmica fornecida pelos gases de combustão.

Tabela 16 – Parâmetros dos motores de combustão interna.

<b>Modelo do Motor ⇨</b>		<b>VOLVO PENTA TAD734GE</b>	<b>VOLVO PENTA TAD1343GE</b>	<b>VOLVO PENTA TAD1342GE</b>
Temperatura de entrada no motor	°C	32	32	32
Pressão de entrada no motor	kPa	101,325	101,325	101,325
Temperatura de entrada no motor	K	305	305	305
Volume específico no ponto 1	m <sup>3</sup> /kg	0,864	0,864	0,864
Coeficiente isentrópico 1-2	-	1,377	1,375	1,375
Temperatura no ponto 2	K	886,50	904,40	904,40
Pressão no ponto 2	kPa	5006,64	5438,20	5438,20
Volume específico no ponto 2	m <sup>3</sup> /kg	0,0508	0,0477	0,0477
Vazão mássica de combustível	kg/s	0,01253	0,01961	0,01926
Vazão mássica de ar	kg/s	0,36016	0,55106	0,56484
Delta de entalpia de combustão	[kJ/kg]	1452,16	1484,56	1424,65
Calor específico a pressão constante médio dos pontos (2-3)	kJ/kg.K	1,0632	1,0258	1,0586
Temperatura no ponto 3	K	2252,36	2351,57	2250,23
Pressão no ponto 3	kPa	5006,64	5438,20	5438,20
Volume específico no ponto 3	m <sup>3</sup> /kg	0,1291	0,1241	0,1188
Calor específico a pressão constante médio dos pontos (3-4)	kJ/kg.K	1,1364	1,1031	1,1418
Coeficiente isentrópico 3-4	-	1,3379	1,3517	1,3357
Temperatura no ponto 4	K	1184,98	1188,58	1155,81
Pressão no ponto 4	kPa	393,66	394,86	383,97
Volume específico no ponto 4	m <sup>3</sup> /kg	0,864	0,864	0,864
Calor específico a pressão constante médio dos pontos (4-5)	kJ/kg.K	1,2409	1,2400	1,2294
Calor específico a volume constante médio dos pontos (4-5)	kJ/kg.K	0,9539	0,9530	0,9424
Delta de entalpia no turbocompressor	kJ/kg	416,71	447,37	433,17
Temperatura no ponto 5	k	748,150	719,150	696,150
<b>TROCADOR DE CALOR</b>				
Calor específico a pressão constante médio da entrada e saída	[kJ/kg.K]	1,1351	1,1328	1,1266
Temperatura de entrada	[K]	748,15	719,15	696,15
Temperatura de saída	[K]	423	423	423
Temperatura média	[K]	585,56	571,08	559,58
Vazão mássica	[kg/s]	0,37269	0,57067	0,58410
Calor fornecido para o <i>chiller</i>	[kW]	137,55	191,46	179,75

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

A análise energética dos motores de combustão interna é mostrada a partir da Tabela 16. Essa análise levou em conta cada ponto do ciclo Diesel, também foram utilizados os catálogos e levaram-se em conta os dados da localidade do estabelecimento. Além das

informações dos motores, a tabela traz os dados do trocador de calor para o aproveitamento nos *chillers* de absorção. O modelo TAD734GE não foi considerado para o aproveitamento de calor. Os outros dois modelos utilizam o mesmo motor, diferenciando apenas na quantidade de combustível injetado. Os cálculos também levaram em conta o excesso de ar admitido nos motores. Os motores possuem o sistema de turbocompressor, utilizado para aumentar a potência. Os cálculos do turbocompressor correspondem do ponto 4 até o ponto 5. Após o ponto 5, os gases de exaustão irão para o trocador de calor.

A análise energética da microturbina está demonstrada na tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros da microturbina.

<b>Modelo da Turbina</b>		<b>Capstone C200</b>
Condições de Entrada	Pressão de entrada [kPa]=	101,325
	Temperatura de entrada [°C]=	32
	Temperatura de entrada [K]=	305,15
	Vazão mássica de combustível [kg/s]=	0,0124
	Vazão mássica de ar [kg/s]=	1,2846
	Razão combustível-ar =	0,010
Compressor	Razão de pressão=	4
	Pressão de saída [kPa]=	405,3
	C <sub>p</sub> médio do ar [kJ/kg.K]=	1,013
	GAMA=	1,398
	Temperatura de saída Isentrópica [K]=	452,83
	Eficiência Isentrópica do compressor=	0,8
	Delta de entalpia real no compressor [kJ/kg]	186,92
	Temperatura de saída real [K]=	489,76
Câmara de combustão	Temperatura de entrada [K]=	489,76
	Delta de entalpia [kJ/kg]=	477,50
	C <sub>p</sub> médio do ar [kJ/kg.K]=	1,0800
	Temperatura de saída [k]=	931,90
Turbina	Pressão de entrada [kPa]=	405,3
	C <sub>p</sub> médio dos gases de escape [kJ/kg.K]=	1,14535
	GAMA=	1,3364
	Temperatura de saída [K] Isentrópica=	657,39
	Eficiência Isentrópica Turbina=	0,85
	Delta de entalpia real na turbina [kJ/kg]=	267,25
	Temperatura de saída [K] Real=	698,57
Recuperador de calor	C <sub>p</sub> médio dos gases de escape [kJ/kg.K]=	1,1034
	Eficiência de troca térmica =	0,85
	Delta de entalpia recuperada [kJ/kg]=	117,01
	Temperatura de saída [K]=	573,8
	Temperatura de saída [°C]=	300,65
<b>TROCADOR DE CALOR</b>		
Coeficiente isentrópico	-	0,7313
C <sub>p</sub>	[kJ/kg.K]	1,0708
Temperatura de entrada	[K]	573,800
Temperatura de saída	[K]	423
Vazão mássica	[kg/s]	1,29700
Calor fornecido para o <i>chiller</i>	[kW]	209,442

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

A análise energética da microturbina, demonstrada na Tabela 17, também considerou o catálogo do fabricante e as condições locais. Foi utilizado o metano como combustível para os cálculos. Assim como nos motores, levou-se em conta o excesso de ar e foram analisados cada ponto do ciclo. Neste caso, foi analisado o ciclo Brayton. Para os cálculos da análise da microturbina, foram consideradas as eficiências isentrópicas do compressor e da turbina de 80% e 85%, respectivamente.

Como foi observada no catálogo, a microturbina Capstone C200 utiliza um recuperador de calor e para a sua análise foi considerada uma eficiência na troca térmica de 85%. Após a passagem dos gases de exaustão pelo recuperador de calor, eles seguirão para o trocador de calor, e na tabela também está demonstrada a análise energética do trocador de calor, o qual fornece uma potência de 209,442 kW.

#### 4.4 Resumo das configurações dos sistemas propostos

Com as análises energéticas e os dados dos equipamentos, montou-se a Tabela 18. A partir da tabela pode ser feita comparações entre os 10 panoramas propostos.

Tabela 18 – Resumo comparativo dos modelos propostos.

Parâmetro	Entrada		Saída					MOTOR / TURBINA	Sistema de Refrigeração
	Energia do combustível	Fluxo mássico de combustível	Potência elétrica produzida	Potência térmica dos gases de exaustão	Excedente de Energia Elétrica	Excedente de Energia Térmica	Eficiência global		
	kW	kg/s	(kWe)	(kWth)	(kWe)	(kWth)	%		
Panorama 1	832,14	0,01926	319,13	179,75	252,17	1,56	65,40	TAD1342 GE	Thermax
Panorama 2	832,14	0,01926	319,13	179,75	256,76	11,78	65,40	TAD1342 GE	LG
Panorama 3	847,20	0,01961	326,53	191,45	259,57	13,27	65,11	TAD1343 GE	Thermax
Panorama 4	847,20	0,01961	326,53	191,45	264,16	23,48	65,11	TAD1343 GE	LG
Panorama 5	541,20	0,01253	203,50	137,55	52,97	137,55	62,43	TAD734GE	CARRIER
Panorama 6	541,20	0,01253	203,50	137,55	57,89	137,55	63,34	TAD734GE	HITACHI
Panorama 7	581,59	0,01163	183,2	209,44	116,25	31,25	70,20	CAPSTONE C200	Thermax
Panorama 8	581,59	0,01163	183,2	209,44	120,83	41,47	70,20	CAPSTONE C200	LG
Panorama 9	581,59	0,01163	183,2	209,44	32,67	209,44	54,61	CAPSTONE C200	CARRIER
Panorama 10	581,59	0,01163	183,2	209,44	37,59	209,44	55,45	CAPSTONE C200	HITACHI

Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Através da Tabela 18, pode-se ter uma visão mais abrangente das informações utilizadas como parâmetros de comparação para ser feita a escolha do sistema de cogeração mais adequado ao estabelecimento comercial. Através da Tabela 18, nota-se que as configurações possuem eficiência global de cogeração acima de 54%, chegando ao patamar máximo de 70,2%. Todas as configurações geram um excedente de energia elétrica, a qual pode ser inserida na rede da concessionária e utilizada no momento em que o sistema de condicionamento estiver desligado.

Em função da alta eficiência global de cogeração e em função do COP do *chiller* da LG ser maior que a do *chiller* da Thermax, foi selecionado o panorama 8 para o estabelecimento estudado. O panorama 8 corresponde a configuração composta pela microturbina Capstone C200 e o *chiller* LG.

Vale ressaltar que essa configuração também é capaz de suprir o acréscimo calculado de 19,56 kWe no aumento do consumo de energia elétrica do estabelecimento no período de vinte anos.

A Figura 24 mostra um resumo comparativo entre os diferentes panoramas obtidos através das configurações propostas anteriormente.

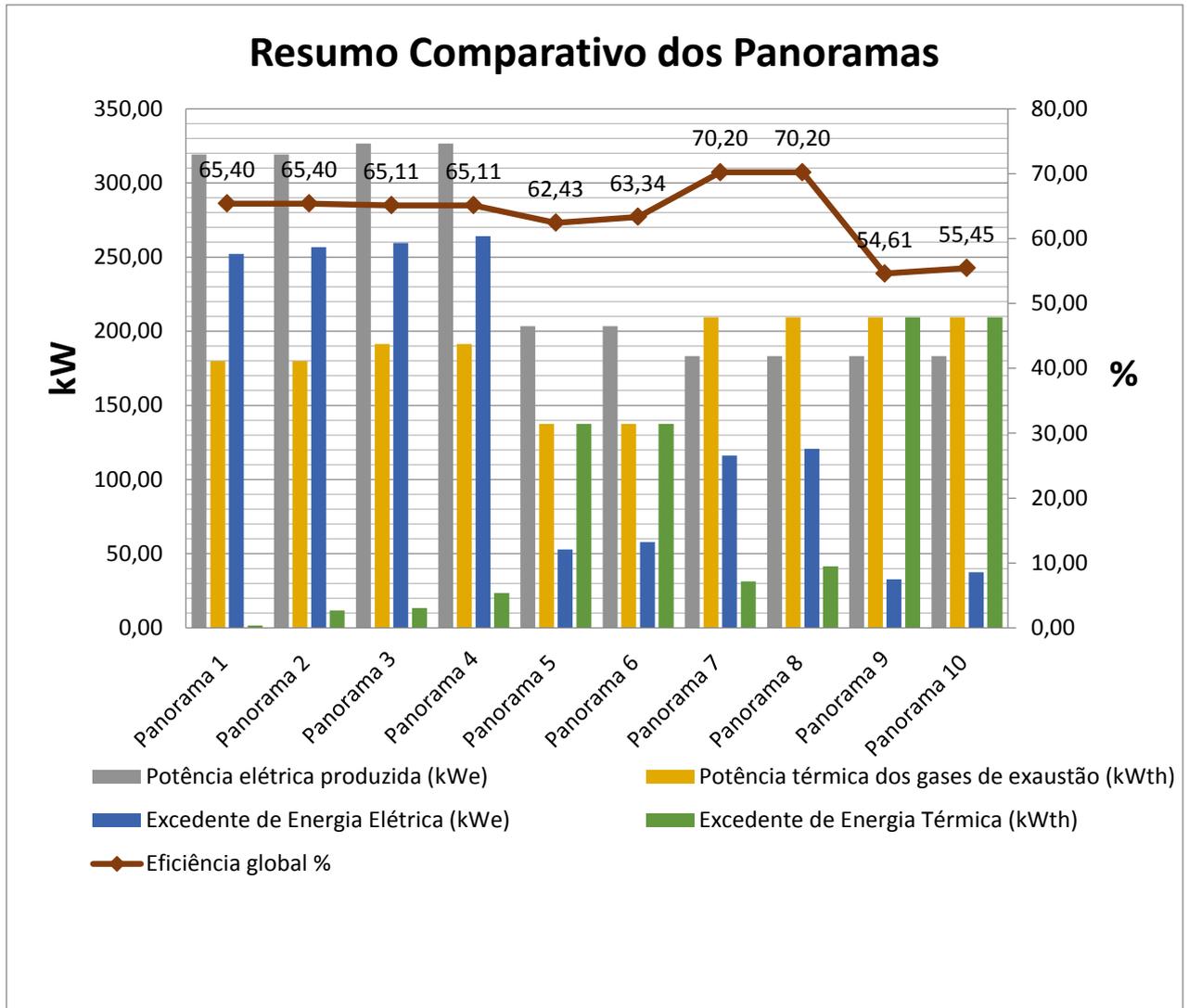


Figura 24 - Resumo comparativo entre os 10 panoramas.  
Fonte: Pesquisa Direta (2017).

Na análise da Figura 24, tem-se que do panorama 1 ao 6 são utilizados motores de combustão interna. Já do panorama 7 ao 10 foi utilizado microturbina a gás. Nos panoramas 1, 2, 3, 4, 7 e 8, percebe-se que o excedente de energia térmica é baixo e o excedente de energia elétrica é alto. Isso se deve pelo fato de que são utilizados *chillers* que operam no ciclo de refrigeração por absorção de calor e de possuírem um baixo gasto elétrico. Já os panoramas 5, 6, 9 e 10 possuem um grande excedente de energia térmica e um menor excedente de energia elétrica. Isso ocorre devido à utilização de *chillers* que operam no ciclo de refrigeração por compressão.

Os panoramas 1, 2, 3 e 4, quando comparado com os outros, necessitam de um alto fluxo de combustível, em função de a sua eficiência térmica ser relativamente alta para

motores de combustão interna, chegando a 47%. Como os motores precisam atingir certo patamar de calor rejeitado pelos gases para alimentar o *chiller* e aliado a sua eficiência alta, estes necessitam de um maior consumo de combustível.

Ainda da Figura 24, verifica-se que os panoramas com maior eficiência global de cogeração são o panorama 7 e 8 com uma produção de 183,2 kWe. Para propor o melhor panorama, avaliou-se a quantidade de excedente de energia elétrica dos dois panoramas. O panorama 8 possui excedente de energia elétrica 3,93% maior que o do panorama 7. Com a análise técnica realizada, o panorama mais indicado para o supermercado analisado é o panorama 8.

## 5 CONCLUSÃO

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

### 5.1 Conclusões

No Brasil, a aplicação de sistemas de cogeração em supermercados ainda é muito restrita, sendo utilizados somente pelas grandes redes e em um número ainda muito baixo de casos aplicados.

A partir dos resultados deste trabalho, chegou-se a configuração que melhor se enquadra ao estabelecimento em estudo é a que utiliza uma microturbina a gás associada a um equipamento de refrigeração por absorção de calor. A vazão mássica de combustível fornecida para a microturbina é de 0,01163 kg/s, fornecendo assim 183,2 kW<sub>e</sub> para o estabelecimento e 209,44 kW<sub>th</sub> para o *chiller*. Com o *chiller* operando em sua carga máxima, ele é capaz de fornecer 246 kW de água gelada. Sendo superior a demanda de água gelada do estabelecimento que é de 225,08 kW. Com isso, este sistema deve operar em capacidade parcial. Esta informação nos prediz que a pergunta problema foi respondida a contento.

O objetivo deste trabalho foi de estudar a viabilidade técnica do emprego de um sistema de cogeração para um estabelecimento comercial (supermercado). Os objetivos específicos indicavam a realização de uma revisão bibliográfica acerca dos temas propostos para o estudo, a identificação de parâmetros de caracterização do estabelecimento e a análise e detalhamento do sistema de cogeração proposto. Em vista do exposto, este trabalho cumpriu com todos os objetivos propostos.

Com a razão entre calor e potência de 3,76, a Devki Energy Consultancy indica que o sistema mais apropriado de cogeração para este estabelecimento seria a utilização de turbinas a vapor. Como as demandas energéticas do supermercado são baixas para se adotar este sistema, optou-se pela análise técnica de sistemas que contemplam o emprego de microturbinas e motores de combustão interna associados à *chillers*.

A metodologia utilizada neste trabalho é de caráter quantitativo, uma vez que foi necessária a realização de cálculos e a análise de dados. Possui caráter descritivo quanto ao objetivo, já que foram estudados e necessários alguns ciclos termodinâmicos. Ainda para este trabalho, fez-se uma revisão bibliográfica para que o trabalho tenha um embasamento científico e por ultimo, foi realizado um estudo de caso.

Por meio das configurações proposta anteriormente, foi obtido um total de 10 panoramas. Os quais empregavam microturbinas, motores de combustão interna e *chillers*. As eficiências desses panoramas ficaram de 54,61% até o máximo de 70,20%. Os sistemas de cogeração propostos foram dimensionados para operar em paridade térmica e sua configuração é do tipo *topping*. Houve a recuperação do calor oriunda dos gases de exaustão da microturbina para ser aproveitado no *chiller* de absorção. Esta configuração que é composta pela microturbina Capstone C200 e pelo *chiller* LG WCDN, obteve uma eficiência global de cogeração de 70,20% e um excedente de energia elétrica, que pode ser inserido na rede de transmissão da concessionária e utilizado posteriormente.

Assim, conclui-se que a aplicação de sistemas de cogeração para a micro-geração é possível e que deve ser estudada para diversas aplicações.

## 5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Estão citadas algumas sugestões para futuros trabalhos no estabelecimento, como complemento deste trabalho:

- Análise de viabilidade econômica dos sistemas de cogeração propostos;
- Análise de um sistema de cogeração operando em paridade elétrica com queima suplementar para suprir a necessidade de calor do *chiller* de absorção;
- Análise exergética das máquinas térmicas envolvidas no sistema de cogeração;
- Estudo da aplicação de termoacumulação para o sistema de condicionamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NIELSEN, 1997, *apud* CLEMENTE, E. S. A garantia da segurança dos alimentos perecíveis no setor supermercadista. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS – DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO ALIMENTAR E NUTRIÇÃO, 2003.
- ABRACEEL – **Associação** Brasileira dos Comercializadores de Energia. No comércio, onde a energia pesa mais nos custos operacionais, a saída tem sido buscar sistemas que reduzem o consumo. Disponível em [http://www.abraceel.com.br/zpublisher/materias/clipping\\_txt.asp?id=184725](http://www.abraceel.com.br/zpublisher/materias/clipping_txt.asp?id=184725) . Acesso em 11/10/2016.
- ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – Visão geral do setor – 01/06/2016. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>. Acesso em: 01/06/2016.
- Acesso em 12/02/2016.
- ALVES, J. D. F. S., RIBEIRO, L. C. M. A utilização do setor elétrico brasileiro na implementação de políticas públicas (1930-1994). Revista *Ágora*, Vitória, n.3, 2006, p. 1-36, 2006.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em 04/10/2016.
- ANREDOS, R. Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA. 2013.
- ARRIGHI, W. M. *et al.* MENDES, V. D. S. Pesquisa de marketing: o mercado do supermercado viçosense- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE PRODUÇÃO, 2006.
- ARTEAGA, J. A. F. Análise energética e exergética de um sistema de cogeração com motores de combustão interna. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010.
- BALESTIERI, 2002 *apud* BARJA, G. D. J. A., A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – FACULDADE DE TECNOLOGIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 2006

- BALESTIERI, 2002, *apud* MOGAWER, T. Análise técnica e econômica para seleção de sistemas de cogeração em ciclo combinado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP- FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ. 2005.
- BARJA, G. D. J. A. A Cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 157 pág. 2006.
- BARJA, 2006, *apud* FABRES, J. P. M. M. R, Desenvolvimento de uma ferramenta para análise técnica-econômica da implantação de sistemas de cogeração. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.
- BARJA, G. D. J. A. A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – FACULDADE DE TECNOLOGIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 2006
- BRANCO, N. N. Avaliação de Índices de Consumo de Energia Para Supermercados Monografia Universidade de São Paulo – Escola politécnica, 71 págs. 2010.
- BRANDÃO, S. S. Cogeração – trabalho no âmbito da cadeira: produção e planejamento de energia eléctrica- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES – UNIVERSIDADE DE COIMBRA, 2004.
- BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. Volume 1. Editora Blücher Ltda. 2014.
- BRUNO, L. Energia passa a ser 2ª maior despesa de supermercados. Disponível em <http://exame.abril.com.br/economia/noticias/energia-passa-a-ser-2a-maior-despesa-de-supermercados>. Acesso em 22/11/2015.
- CAVALCANTE, Z. V., DA SILVA, M. L. S. **A Importância da Revolução Industrial no Mundo da Tecnologia.** Disponível em: [http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2011/anais/zedequias\\_vieira\\_cavalcante2.pdf](http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2011/anais/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf). Acesso em 29/05/2016.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. Kátia Aparecida Roque. 5.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- DA SILVA, B. G. Evolução do setor elétrico brasileiro no contexto econômico nacional: uma análise histórica e econométrica de longo prazo. Universidade de São Paulo – USP. Programa de Pós-Graduação em Energia. 2011.
- DE GODOY, S. G. M. *apud* CHANDER (2016). O Protocolo de Kyoto e os Países em Desenvolvimento: Uma Avaliação da Utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental- PROCAM. Universidade de São Paulo – USP. 2010.

- DE GODOY, S. G. M. O Protocolo de Kyoto e os Países em Desenvolvimento: Uma Avaliação da Utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental- PROCAM. Universidade de São Paulo – USP. 2010.
- DEL CARLO, F. R. Comparação de modelos de custo dos produtos gerados em uma central de cogeração. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ. 2007.
- DGE, 2002, *apud* OLIVEIRA, J. A. B. Estudo de eficiência energética na refrigeração de um supermercado – UNIVERSIDADE DE AVEIRO – DEPARTAMENTO DE ECONOMIA, GESTÃO E ENGENHARIA INDUSTRIAL, 2012.  
Disponível em [http://www.ons.org.br/tabela\\_reservatorios/conteudo.asp](http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp).
- DOS REIS, H. B. C. **Os Impactos da Globalização Sobre o Meio Ambiente: Uma Introdução à Análise da Comunicação Social.** Disponível em: [http://www.contemporanea.uerj.br/pdf/ed\\_04/contemporanea\\_n04\\_15\\_HeloizaBeatriz.pdf](http://www.contemporanea.uerj.br/pdf/ed_04/contemporanea_n04_15_HeloizaBeatriz.pdf). 2015.
- EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço Energético Nacional – BEN2015. Disponível em <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategoriaID=347>. Acesso em 13/11/2015b.
- EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço Energético Nacional – BEN 2015 - Relatório Síntese. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2015\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf). Acesso em 04/10/2016.
- EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. Plano Decenal De Expansão De Energia 2023. Disponível em <http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>. Acesso em 13/11/2015a.
- FABRES, J. P. M. M. R, Desenvolvimento de uma ferramenta para análise técnica-econômica da implantação de sistemas de cogeração. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.
- FISCHER, 2003, *apud* PORTILLA, G. F. D. Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2010.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica.** Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GAZETA MERCANTIL – Sonda recebe projeto de cogeração – 17/02/2005 – Setor Elétrico.  
Disponível em:

[http://www2.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/cl\\_pesquisa.php?pg=cl\\_abre&cd=hhiaeZ30DQfd](http://www2.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/cl_pesquisa.php?pg=cl_abre&cd=hhiaeZ30DQfd).

Acesso em: 18/10/2005.

- GIL, ANTONIO CARLOS. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GOLDENBERG, J., PRADO, L. T. S. Reforma e crise do setor elétrico no período FHC. Tempo Social – USP, 2003.
- GOMES, J. P. P., VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. EBAPE – FGV, Revista de administração pública – RAP, 2009.
- GRUPO PÃO DE AÇÚCAR – Relatório Anual e de Sustentabilidade – 2010. Disponível em: [http://www.gpabr.com/wp-content/uploads/2016/08/relatorioanual2010\\_port.pdf](http://www.gpabr.com/wp-content/uploads/2016/08/relatorioanual2010_port.pdf). Acesso em: 18/10/2016.
- GUIMARÃES, L. G. M. Modelagem e construção de protótipo de refrigerador por absorção de vapor de baixa potência operando com o par água-brometo de lítio e utilizando fontes térmicas de baixa temperatura. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, 2011.
- LEE *et al*, 2006 *apud* PORTILLA, G. F. D. Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2010.
- LINERO, 2006, *apud* BASQUEROTTO, C. H. C. C. Cogeração de energia elétrica com bagaço de cana-de-açúcar comprimido (briquete). FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ARAÇATUBA – CURSO DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS, 2010.
- LORA, E. E., NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica, planejamento, projeto e operação, volume 2 – Editora Interciência, 2004.
- MARCHIONNI, L. Análise da cogeração aplicada em microempresas. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA. 2004
- MARTINELLI, 2002, *apud* DEL CARLO, F. R. Comparação de modelos de custo dos produtos gerados em uma central de cogeração. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ. 2007.
- MENNA, M. R. M. Modelagem e análise de custo de sistemas de refrigeração por absorção. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, 2008
- MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

- MME – Ministério De Minas E Energia. Emissão de co2 no brasil é 70 vezes menor que média mundial. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/10/emissao-de-co2-no-brasil-e-70-vezes-menor-que-media-mundial>. Acesso em 11/10/2016.
- MSPC, Termodinâmica V-25, 2016. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/termo/termod0525.shtml>. Acesso em: 27/06/2016.
- NAIME, L., TREVIZAN, K., LAPORTA, T. **PIB do Brasil terá 2º pior desempenho do mundo em 2016**. Disponível em <http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/02/pib-do-brasil-tera-2-pior-desempenho-do-mundo-em-2016-aponta-fmi.html>. Acesso em 10/05/2016.
- ONOVWIONA, UGURSAL, 2016 *apud* ARTEAGA, J. A. F. Análise energética e exergetica de um sistema de cogeração com motores de combustão interna. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico – O setor elétrico – 01/06/2016. Disponível em: [http://www.ons.org.br/institucional/modelo\\_setorial.aspx](http://www.ons.org.br/institucional/modelo_setorial.aspx). Acesso em: 01/06/2016.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. Situação dos Principais Reservatórios do Brasil – 11/02/2016.
- PANESI, 2008, *apud* PORTILLA, G. F. D. Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2010.
- PORTILLA, G. F. D. Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2010.
- PROCEL – Manual de tarifação da energia elétrica. EPP- Eficiência energética nos prédios públicos. Agosto/2011. Acesso em 16/06/2016. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel\\_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf).
- ROJO, 1998, *apud* CLEMENTE, E. S. A garantia da segurança dos alimentos perecíveis no setor supermercadista. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS – DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO ALIMENTAR E NUTRIÇÃO, 2003.
- SANTOS, T. A. R., Serviços de energia aplicados à cogeração. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO – FEUP, 2010.

- SEMAE, 2011, *apud* FABRES, J. P. M. M. R, Desenvolvimento de uma ferramenta para análise técnica-econômica da implantação de sistemas de cogeração. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- ZORATTO (2002), *apud* DEL CARLO, F. R. Comparação de modelos de custo dos produtos gerados em uma central de cogeração. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ. 2007.

## ANEXO I



## CÁLCULO SIMPLIFICADO DE CARGA TÉRMICA

## SEGUNDO NBR 5410

1 Janelas: Insolação		PROTEÇÃO			CAMPOS PARA PREENCHIMENTO			
Tipo de Vidro	Localização	Área (m <sup>2</sup> )	Sem	Com/Interna	Com/Externa	Fator	Energia	
							(kcal/h)	(BTU)
C	Norte	-	240	115	70	-	-	-
C	Nordeste	150,50	240	95	70	240,00	36.120,00	143.324,16
C	Leste	-	270	130	85	-	-	-
C	Sudeste	137,40	200	85	70	200,00	27.480,00	109.040,64
C	Sul	-	0	0	0	-	-	-
C	Sudoeste	242,70	400	160	115	400,00	97.080,00	385.213,44
C	Oeste	-	500	220	150	-	-	-
C	Noroeste	42,60	350	150	95	350,00	14.910,00	59.162,88
							97.080,00	385.213,44
<b>2 Janelas: Transmissão (Deve-se somar todas as áreas de mesmo material)</b>								
		Área (m <sup>2</sup> )			Fator			
Vidro Comum		18,38			50	919,00 3.646,59		
Tijolo de Vidro		-			25	- -		
							919,00	3.646,59
<b>3 Paredes:</b>								
<b>Paredes externas</b>		Área (m <sup>2</sup> )	Construção Leve	Construção Pesada		Fator		
orientação Sul		-	13	10		- -		
outra orientação		554,82	20	12		12,00	6.657,84	26.418,31
<b>Paredes internas</b>		Área (m <sup>2</sup> )			Fator			
Paredes (amb.ñ.ref.)		110,30			13	1.433,90 5.689,72		
							8.091,74	32.108,02
<b>4 Teto:</b>								
		Área (m <sup>2</sup> )			Fator			
Em lage exposta ao Sol sem isolamento		521,25			75	39.093,75 155.124,00		
Em lage com 2,5cm de isolamento ou mais		-			30	- -		
Entre andares		-			13	- -		
Sob telhado com isolamento		175,50			18	3.159,00 12.534,91		
Sob telhado sem isolamento		-			50	- -		
							42.252,75	167.658,91
<b>5 Piso: (exceto os diretamente sobre o solo)</b>								
		Área (m <sup>2</sup> )			Fator			
Piso		-			13	- -		
							-	-
<b>6 Número de Pessoas</b>								
		Número			Fator			
Em atividade normal		150,00			150	22.500,00 89.280,00		
Em repouso		-			75	- -		
Em forte atividade		20,00			750	15.000,00 59.520,00		
							37.500,00	148.800,00

7 Outras fontes de Calor:			Energia (kcal/h)	Energia (BTU)	
	<b>Potência (W)</b>	Fator			
Aparelhos Elétricos	7.352,00	0,86	6.322,72	25.088,55	
Forno Elétrico	-	0,86	-	-	
Aparelhos de Grelhar	-	0,86	-	-	
Mesa Quente	-	0,86	-	-	
Cafeteiras	-	0,86	-	-	
	<b>Potência (HP)</b>	Fator			
Motores	-	645	-	-	
	<b>Nº Refeições</b>	Fator			
Alimentos por pessoa	-	16	-	-	
	<b>Potência (W)</b>	Fator			
Iluminação					
Incandescente		1	-	-	
Fluorescente	2.800,00	0,5	1.400,00	5.555,20	
			<b>7.722,72</b>	<b>30.643,75</b>	
8 Portas ou vãos continuamente abertos para áreas não condicionadas					
	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	Fator			
Portas	31,88	150	4.782,00	18.974,98	
			<b>4.782,00</b>	<b>18974,976</b>	
9 Sub - Total			em (kcal/h)	193.566,21	768.070,72
10 Fator Geográfico:			em (kcal/h)	193.566,21	768.070,72
	<b>1</b>	Referente ao índice da Região (MAPA)			
11 Carga térmica Total			em (kcal/h)	<b>193.566,21</b>	
			em (BTU/h)	<b>768.070,72</b>	
			em TR	<b>64,01</b>	
			em kW	<b>225,08</b>	

