



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MARCOS OLÍVIO SCARAMUSSA JÚNIOR

SISTEMAS DE COGERAÇÃO PARA PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS DO SETOR TERCIÁRIO



SALVADOR
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MARCOS OLÍVIO SCARAMUSSA JÚNIOR

**SISTEMAS DE COGERAÇÃO PARA PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS DO SETOR TERCIÁRIO**

Salvador

2019

MARCOS OLÍVIO SCARAMUSSA JÚNIOR

**SISTEMAS DE COGERAÇÃO PARA PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS DO SETOR TERCIÁRIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadores:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Prof. Dr. Julio Augusto M. da Silva

Salvador

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

SCARAMUSSA JÚNIOR, MARCOS OLÍVIO
SISTEMAS DE COGERAÇÃO PARA PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS DO SETOR TERCIÁRIO / MARCOS OLÍVIO
SCARAMUSSA JÚNIOR. -- Salvador, 2019.
105 f. : il

Orientador: Ednildo Andrade Torres.
Coorientador: Julio Augusto M. da Silva.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) --
Universidade Federal da Bahia, UFBA, 2019.

1. cogeração. 2. supermercado. 3. motor de
combustão interna a gás natural,. 4. geração
distribuída.. I. Torres, Ednildo Andrade. II. da
Silva, Julio Augusto M. . III. Título.

“SISTEMAS DE COGERAÇÃO PARA PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS DO SETOR TERCIÁRIO”

MARCOS OLÍVIO SCARAMUSSA JÚNIOR

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

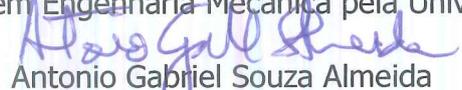
Examinada por:



Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil, 1999



Prof. Dr. Julio Augusto Mendes da Silva
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP), Brasil, 2013



Prof. Dr. Antonio Gabriel Souza Almeida
Doutor em Energia e Ambiente pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil, 2017



Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira
Doutor em Energia e Ambiente pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil, 2013

Salvador, BA - BRASIL
Julho / 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Marcos e Lícia; e a meu irmão, Marcony, pelo apoio incondicional e motivação durante toda minha jornada educacional. À Lorena, pelo companheirismo, paciência e coragem nesse recomeço de vida profissional e acadêmica; e principalmente, por ter me dado a oportunidade de colocar nesse mundo o nosso Léo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho e em especial aos meus orientadores, professores Ednildo Andrade Torres e Julio Augusto Mendes da Silva, pela paciência, incentivo, direcionamentos na condução da pesquisa e por me proporcionarem total liberdade para eu ficar à vontade no trabalho e com o trabalho nesses dois anos.

À Universidade Federal da Bahia, em especial, à equipe e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), pelos ensinamentos e oportunidade de realizar esse trabalho. Aos colegas do Laboratório de Energia e Gás (LEN) pela amizade, dicas e risadas nesse período; não vou esquecer.

“O trabalho salva o homem de três grandes males: tédio, vício e necessidade.”

Voltaire

RESUMO

A viabilidade técnica, ambiental e econômica de sistemas de cogeração de energia, baseados em motor alternativo a gás natural e *chiller* por absorção foi investigada. Projetos que atendam à crescente demanda por diversificação da oferta energética no Brasil já são bem estudados, mas o alinhamento entre as modernas legislações de incentivo e regulação com as tecnologias disponíveis no mercado para aplicação em supermercados não é bem compreendido. O objetivo do estudo foi dividido em: desenvolvimento de um indicador técnico (AT) e um indicador econômico (VEO) para avaliação geral de projetos de cogeração; aplicação de um indicador ambiental; mapeamento das restrições e exigências de projeto no que diz respeito à legislação da cogeração qualificada e compensação de energia; levantamento da carga térmica e elétrica em um estudo de caso; modelagem da planta de cogeração para atender o estudo de caso; avaliação do estudo de caso por meio dos indicadores desenvolvidos. Os resultados apresentam as melhores combinações para implantação de sistemas de cogeração, através de uma abordagem técnica, utilizando diferentes modelos de *chiller* por absorção; e uma abordagem ambiental, com a emissão de CO₂ desses sistemas, comparada com a emissão da matriz brasileira. No quesito econômico, os resultados apresentam a viabilidade de implantação do modelo em um supermercado, junto com a projeção diária do faturamento da energia e uma análise de investimentos em três cenários de risco. O modelo mostrou que o sistema proposto é tecnicamente e financeiramente viável em todos os cenários. No 1º cenário, com o sistema funcionando 14 horas por dia, o VEO e o VPL foram positivos, a TIR ficou em 4,4% a.m. e um *payback* de 3,6 anos. No 2º cenário, com o modelo operando 24 horas por dia, o VEO e o VPL continuaram positivos, com a TIR em 6,5% a.m. e um *payback* de 2,6 anos. Para o 3º cenário, com o modelo sendo auxiliado por um reservatório térmico para acumular água gelada, todos os indicadores de investimentos continuaram favoráveis, com VEO e VPL positivos, TIR em 4,2% a.m. e *payback* de 3,7 anos.

Palavras Chave: cogeração, motor de combustão interna a gás natural, *chiller* por absorção, supermercado, geração distribuída.

ABSTRACT

The technical, environmental and economic feasibility of cogeneration systems, based on natural gas internal combustion engines and absorption chillers was investigated. Projects that meet the growing demand for diversification of energy supply in Brazil are already well studied, but the alignment between the modern incentive and regulation laws with the technologies available in the market for application in supermarkets are not well understood. The objective of the study was divided into: development of a technical indicator (AT) and an economic indicator (VEO) for a general evaluation of cogeneration projects; application of an environmental indicator; mapping constraints and project requirements with respect to the legislation of qualified cogeneration and energy compensation; electrical and thermal load survey in a case study; modeling of the cogeneration plant to meet the case study; evaluation of the case study using the indicators developed. The results present the best combinations for the implementation of cogeneration systems, through a technical approach, using different absorption chiller models; and an environmental approach, with the emission of CO₂ from these systems, compared to the emission of the Brazilian matrix. In the economic aspect, the results show the feasibility of implementing the model in a supermarket, together with the daily projection of energy billing and an investments analysis in three risk scenarios. The model showed that the proposed system is technically and financially viable in all scenarios. In the first scenario, with the system running 14 hours a day, the VEO and NPV were positive, the IRR was 4.4% a.m. and a payback of 3.6 years. In the second scenario, with the model operating 24 hours a day, VEO and NPV remained positive, with the IRR at 6.5% a.m. and a payback of 2.6 years. For the third scenario, with the model being aided by a thermal reservoir to accumulate cold water, all investment indicators remained favorable, with VEO and NPV positive, IRR at 4.2% a.m. and payback at 3.7 years.

Keywords: Cogeneration, Natural gas internal combustion engine, Absorption *chiller*, Supermarket, Distributed generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Projeção para exportação e importação do GN por região.....	24
Figura 2 – Projeção do consumo, produção e comercialização do GN.....	25
Figura 3 – Demanda por gás natural na Ásia emergente.....	24
Figura 4 – Demanda e produção de gás natural.....	26
Figura 5 – Demanda e produção de gás natural.....	27
Figura 6 – Crescimento (%) do consumo da energia x Consumo energético por combustível na indústria.....	27
Figura 7 – Fluxo energético padrão do sistema de cogeração apresentado neste trabalho.....	35
Figura 8 – Modelo do sistema de cogeração de energia com conexão direta entre o motor alternativo e o <i>Chiller</i> por absorção.....	41
Figura 9 – Fluxo teórico de energia (%) de sistemas de cogeração.....	49
Figura 10 – Relação entre perda por evaporação, perda por arraste e ciclos de concentração.....	53
Figura 11 – Modelo do sistema de cogeração de energia utilizando um trocador de calor entre o motor alternativo e o <i>chiller</i> por absorção.....	60
Figura 12 – Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 1.....	61
Figura 13 – Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 2.....	68
Figura 14 – Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 3.....	73
Figura 15 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por água quente.....	77
Figura 16 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por vapor.....	78
Figura 17 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por gás exausto.....	80
Figura 18 – Emissão de CO ₂ dos modelos com <i>chiller</i> operado a água quente, utilizando energia da matriz elétrica brasileira.....	82
Figura 19 – Emissão de CO ₂ dos modelos com <i>chiller</i> operado a gás exausto, utilizando energia da matriz elétrica brasileira.....	82
Figura 20 – Simulação da emissão de CO ₂ com o sistema de cogeração com <i>chiller</i> operado a água quente.....	83
Figura 21 – Simulação da emissão de CO ₂ com o sistema de cogeração com <i>chiller</i> operado a gás exausto.....	84
Figura 22 – Diferença da emissão de CO ₂ entre os sistemas de cogeração com <i>chiller</i> operado a água quente e a energia da matriz elétrica brasileira.....	85
Figura 23 – Diferença da emissão de CO ₂ entre os sistemas de cogeração com <i>chiller</i> operado a gás exausto e a energia da matriz elétrica brasileira.....	85
Figura 24 – VEO para sistemas de cogeração de energia.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de qualificação apresentada pela legislação da ANEEL.....	30
Tabela 2 – Parâmetros característicos do supermercado em estudo.....	56
Tabela 3 – Fatura da energia elétrica em um mês de alto consumo, sem o Sistema de cogeração.....	57
Tabela 4 – Carga térmica de refrigeração do supermercado.....	58
Tabela 5 – Características técnicas principais do <i>chiller</i> por absorção em estudo.....	59
Tabela 6 – Mapa de correntes do sistema de cogeração de energia (cenário 1).....	62
Tabela 7 – Balanço de massa dos volumes de controle (cenário 1).....	64
Tabela 8 – Qualificação do sistema de cogeração.....	64
Tabela 9 – Simulação da conta de energia com o sistema de cogeração.....	65
Tabela 10 – Custo com combustível no sistema de cogeração no cenário 1.....	65
Tabela 11 – Mapa de investimento.....	66
Tabela 12 – Mapa de despesa e receita.....	66
Tabela 13 – Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros.....	67
Tabela 14 – Mapa de correntes do sistema de cogeração de energia (Cenário 2).....	69
Tabela 15 – Balanço de massa dos volumes de controle (Cenário 2).....	70
Tabela 16 – Qualificação do sistema de cogeração.....	70
Tabela 17 – Simulação da conta de energia com o sistema de cogeração.....	71
Tabela 18 – Custo com combustível no sistema de cogeração no cenário 2.....	71
Tabela 19 – Mapa de investimento.....	71
Tabela 20 – Mapa de despesa e receita.....	72
Tabela 21 – Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros.....	72
Tabela 22 – Mapa de investimento.....	74
Tabela 23 – Mapa de despesa e receita.....	74
Tabela 24 – Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros.....	75
Tabela 25 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por água quente.....	76
Tabela 26 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por vapor.....	78
Tabela 27 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com <i>chillers</i> alimentados por gás exausto.....	79
Tabela 28 – Emissão de CO ₂ dos modelos utilizando energia da matriz brasileira.....	81
Tabela 29 – Simulação da emissão de CO ₂ com o sistema de cogeração em funcionamento.....	83
Tabela 30 – Diferença da emissão de CO ₂ entre os sistemas de cogeração e a energia na matriz elétrica brasileira.....	86
Tabela 31 – Aplicação do indicador VEO em modelos de cogeração de energia funcionais.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARS	Absorption Refrigeration Systems
AT	Adequação Termodinâmica
CCL	Climate Change Levy
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
COP	Coeficiente de Performance
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _p	Calor Específico a Pressão Constante
E _e	Energia da Utilidade Eletromecânica
EES	Engineering Equation Solver
EIA	Energy Information Administration
EUA	Estados Unidos da América
E _f	Energia da Fonte
E _t	Energia da Utilidade Calor
F _c	Fator de Cogeração
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
kW	Kilowatts
kWh	Kilowatts-hora
LEN	Laboratório de Energia e Gás

LiBr	Brometo de Lítio
MCI	Motor a Combustão Interna
MW	Megawatts
n	Eficiência
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial
PES	Primary Energy Saving
PIB	Produto Interno Bruto
PIS	Programa de Integração Social
RMS	Região Metropolitana de Salvador
SIN	Sistema Integrado Nacional
SS	Spark Spread
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFBA	Universidade Federal da Bahia
VEO	Viabilidade Econômica Operacional
VPL	Valor Presente Líquido
X	Fator de Ponderação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. JUSTIFICATIVA.....	04
1.2. OBJETIVOS	04
1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	05
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	06
2.1. A COGERAÇÃO.....	07
2.2. MEIO AMBIENTE E OS SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	13
2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	16
2.4. INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS PARA COGERAÇÃO.....	18
2.5. COGERAÇÃO EM SUPERMERCADOS.....	20

CAPÍTULO 2

3. GÁS NATURAL	24
3.1. PERSPECTIVAS E RESERVAS.....	24
3.2. CONSUMO E PRODUÇÃO NO BRASIL.....	27
4. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	28
4.1. RESOLUÇÃO 235 de 2006 – QUALIFICAÇÃO DA COGERAÇÃO.....	29
4.2. RESOLUÇÃO 482 de 2012 e 687 de 2015 – MICRO E MINIGERAÇÃO.....	30
5. TECNOLOGIA DA COGERAÇÃO	34
5.1. FLUXO DA ENERGIA.....	35
5.2. CLASSIFICAÇÃO.....	37
5.2.1. SEQUÊNCIA DO USO DA ENERGIA.....	37
5.3. RISCOS POTENCIAIS PARA IMPLANTAÇÃO.....	38

CAPÍTULO 3

6. METODOLOGIA DE ANÁLISE PARA APLICAÇÃO GERAL.....	40
6.1. MODELO DE SISTEMA DE COGERAÇÃO.....	40
6.2. INDICADOR TÉCNICO.....	41
6.2.1. ADEQUAÇÃO TERMODINÂMICA (AT).....	41

6.3. INDICADOR AMBIENTAL.....	46
6.3.1. GRAU DE EMISSÃO DE CO ₂	46
6.4. INDICADOR ECONÔMICO.....	47
6.4.1. SPARK SPREAD (SS).....	47
6.4.2. VIABILIDADE ECONÔMICA OPERACIONAL (VEO).....	48
6.5. CORRENTES DE FLUXO DOS MODELOS.....	51
6.6. EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS.....	53
6.7. INDICADORES DE INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO.....	54

CAPÍTULO 4

7. ESTUDO DE CASO.....	56
7.1. O SUPERMERCADO.....	56
7.2. MODELAGEM DA PLANTA DE COGERAÇÃO.....	58
7.3. CENÁRIO 1 – Sistema funcionando 14 h por dia.....	61
7.4. CENÁRIO 2 – Sistema funcionando 24 h por dia.....	67
7.5. CENÁRIO 3 – Sistema funcionando 14 h por dia com o suporte de um reservatório térmico.....	73
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
8.1. INDICADOR TÉCNICO (AT).....	76
8.2. INDICADOR AMBIENTAL (kg CO ₂ /kWh).....	81
8.3. INDICADOR ECONÔMICO (VEO).....	86
8.4. APLICAÇÃO NOS CENÁRIOS DO ESTUDO DE CASO.....	88

CONCLUSÃO.....	90
-----------------------	-----------

REFERÊNCIAS.....	91
-------------------------	-----------

APÊNDICE I – Artigos publicados em Revistas e Congressos.....	98
--	-----------

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Estratégias para o uso eficiente da energia e redução na emissão de poluentes têm sido destaque nas pesquisas acadêmicas e corporativas nesta década, período em que o mundo vivenciou diversas crises, desde as causadas pelo uso ineficiente dos recursos naturais às causadas pelas mudanças climáticas. Apesar disso, as projeções de crescimento do PIB mundial continuam promissoras, podendo dobrar até 2040, em função do crescimento das economias emergentes que retirarão mais de 2,5 bilhões de pessoas da pobreza (BP Energy Outlook, 2018).

Esta prosperidade crescente leva a um aumento na demanda global por energia, que poderá ser compensada pelos ganhos em eficiência energética no período. Em 2040, as emissões de carbono na Europa tenderão a ser 35% menores que em 2016, em função das frequentes e obrigatórias políticas de incentivo à geração de energia mais diversificada e eficiente (BP Energy Outlook, 2018).

Acompanhando essa tendência, a exemplo da Resolução 235 de 2006 e Resolução 482 de 2012, ambas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil passou a beneficiar e qualificar o gerador de energia elétrica eficiente. Desse modo, alinhado à nova proposta de pulverização da matriz energética, o governo brasileiro passou a seguir os países desenvolvidos, que utilizam há algum tempo legislações de incentivo à diversificação da matriz e estimulam a geração de energia mais eficiente (Maidment et al., 1999).

Um das formas de geração de energia mais eficiente é através da geração distribuída (GD), que consiste em produzir a energia nas proximidades do ponto onde será utilizada. A utilização desse método proporciona uma série de vantagens para o sistema, tais como a redução dos custos da energia ao usuário, diminuição nas perdas da transmissão, além de uma menor emissão de CO₂ (Arteconi, Brandoni e Polanara, 2009).

Outro ponto importante é que a geração distribuída não está restrita a somente um tipo de técnica de produção de energia, ela pode englobar a geração através de energias renováveis ou combustíveis fósseis, incluindo sistemas de cogeração de energia utilizando motores alternativos. Este último pode ser encontrado em diversos setores da economia, porém 85% destes sistemas são encontrados nos setores industriais e comerciais (EIA – Energy Information Administration, 2018).

A cogeração oferece uma abordagem eficiente para geração de energia elétrica e térmica útil, esta última utilizada para aquecimento e/ou resfriamento de empreendimentos ou processos industriais. Empregando apenas uma fonte de energia, estes sistemas são cada vez mais utilizados, pois são modelos de geração de energia eficazes e já testados há décadas por países desenvolvidos; como os Estados Unidos (EUA), que possui mais de 70 gigawatts (GW) de sistemas de cogeração em funcionamento, representando aproximadamente 10% de toda sua capacidade instalada (EIA – Energy Information Administration, 2018).

Os sistemas de cogeração operam com uma ampla gama de combustíveis tais como biomassa e gás natural; no entanto, a fonte de energia primária mais utilizada é o gás natural, representando 65% da capacidade instalada de cogeração na América do Norte, ao mesmo tempo que se beneficia pelos baixos preços na comercialização deste combustível naquele mercado (EIA – Energy Information Administration, 2018).

Por volta de 2040, a expectativa é que o consumo do gás natural aumente substancialmente, em função da crescente demanda de consumo, novas descobertas de poços para exploração e globalização do mercado explorador e consumidor, o que acarretará em um menor preço de comercialização do combustível (BP Energy Outlook, 2018).

Apesar de serem grandes emissores de CO₂, os motores alternativos de combustão interna a gás natural, funcionando em conjunto com o *chiller* por absorção, proporcionam uma redução substancial na emissão desse poluente, que acaba sendo proporcional à energia consumida pelo *chiller* (Flórez-Orrego, Silva e Oliveira Jr., 2014).

Assim, os sistemas de cogeração de energia, se comparado com os meios clássicos de geração de energia, possuem a reputação de serem altamente eficientes e proporcionam uma geração ambientalmente favorável com reduzida emissão dos gases de efeito estufa (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

Nessa dissertação, uma metodologia é apresentada para determinar os limites de viabilidade técnica, econômica e ambiental para plantas de cogeração com motores alternativos de combustão interna, utilizando o gás natural como combustível, e *chiller* por absorção. Foi realizada uma série de simulações para implantação dos modelos, além de pesquisas das principais tecnologias existentes e comercializadas no mercado, que podem ser utilizadas em sistemas de cogeração com os mais diversos níveis de carga elétrica e térmica.

As simulações envolveram motor a combustão interna e *chiller* por absorção alimentados por água quente, gás exausto e vapor. A busca teve como foco principal apresentar um estudo prático sobre os sistemas de cogeração de energia, dentro dos limites para micro e minigeração, de modo a indicar sistemas com combinações viáveis tecnicamente, economicamente e ambientalmente favoráveis (Isa, Tan e Yatim, 2017).

Como método de análise dos resultados, a dissertação apresenta um indicador técnico, para análise da adequação termodinâmica do sistema e um ambiental; que faz um comparativo entre o grau de emissão de CO₂ (kg CO₂/kWh) dos sistemas apresentados e o emitido pela matriz energética brasileira. Um indicador econômico, adaptado, também é apresentado; com o objetivo de indicar quais os sistemas simulados apresentam maior viabilidade econômica operacional (R\$/kWh).

Por fim, o presente trabalho oferta como contribuição científica a análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental de um sistema de cogeração em um estudo de caso aplicado a um supermercado, que, dentre os mais diversos empreendimentos comerciais, são os principais consumidores de energia elétrica (Baxter, 2005) em função da constante necessidade de refrigeração dos alimentos (Office of Natural Resources, 2003).

1.1. JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, o Brasil tem passado por profundas transformações e ciclos de crescimento descontinuados, em um cenário de incertezas político-econômica-ambiental global. Nesse âmbito, tanto em períodos de crescimento quanto vivenciando cenários de incertezas, houve a necessidade do incremento da oferta de energia, em função da crescente demanda por eletricidade.

A partir disso, novas tecnologias para geração de energia foram incluídas ao sistema integrado nacional (SIN) graças ao aumento da demanda e incentivos governamentais. O sistema de cogeração de energia utilizando motores alternativos de combustão interna e *chillers* por absorção é uma delas, pois tem a capacidade de fornecer ao mesmo tempo energia elétrica e térmica a um determinado empreendimento, por meio de uma geração eficiente, menos custosa e com reduzida emissão de poluentes.

Portanto, a análise das possíveis combinações entre tecnologias disponíveis no mercado como motores alternativos de combustão interna, motores rotativos de combustão interna de fluxo contínuo e diversos tipos de *chillers* por absorção (simples efeito, duplo efeito, alimentados por água quente, gás exausto, vapor, etc); dentro dos critérios estabelecidos para micro e minigeração, pode indicar os limites da viabilidade técnica desses sistemas, além de combinações viáveis economicamente e ambientalmente favoráveis.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo foi analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de sistemas de cogeração de energia baseados em motor alternativo de combustão interna a gás natural e *chiller* por absorção.

Para alcançar o objetivo citado, os objetivos específicos durante a realização desse trabalho foram:

- Compreender e analisar a legislação regulatória correspondente ao programa de cogeração qualificada e ao sistema de compensação de energia;
- Pesquisar e analisar as principais tecnologias existentes no mercado para cogeração;
- Definir e discutir indicadores para avaliação dos modelos, seguindo critérios tecnológicos, econômicos e ambientais;
- Avaliar as combinações mais adequadas entre as tecnologias existentes e dimensionar sistemas de cogeração;

1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O foco dessa pesquisa foi analisar o comportamento dos sistemas de cogeração de energia baseados em motores alternativos a gás natural e *chiller* por absorção dentro do cenário brasileiro.

O projeto proposto refletiu a necessidade do estudo e apresentação de projetos de cogeração viáveis em âmbito técnico, econômico e ambiental; que atendam à crescente demanda e diversificação da oferta de energia no Brasil e que estejam alinhados com as modernas legislações de incentivo e regulação.

Este estudo, portanto, determinou os limites da viabilidade desses modelos, dentro da realidade brasileira e com foco de aplicação em empreendimentos do ramo de alimentação (atacado e varejo), como por exemplo, supermercados.

Os resultados buscam uma convergência ótima para tomada de decisão quanto à implantação ou não desses sistemas, solucionando eventuais conflitos entre os resultados técnicos e de gestão, em cenários de normalidade e incerteza.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Com o objetivo de apresentar o referencial teórico necessário para o entendimento e apuração dos resultados de diversas pesquisas que envolvem o tema '*Sistemas de Cogeração de Energia*', a revisão bibliográfica parte de uma visão geral sobre os sistemas de cogeração e faz um apanhado sobre a necessidade comercial e ambiental da geração de energia mais eficiente.

Na sequência, são apresentados os estudos e resultados para aplicação desses sistemas de forma global, ou seja, nos mais variados empreendimentos e nas mais diversas necessidades. O tópico seguinte foca em trabalhos que se destacaram com resultados voltados para o problema do aquecimento global e que tratam os sistemas de cogeração como ambientalmente favoráveis.

Depois, os pesquisadores que fizeram uma análise de investimento detalhada são relatados. Buscou-se adicionar a essa dissertação pesquisas com análise econômica aplicada em diversos países, com o objetivo de, ao fim desse trabalho, poder comparar o comportamento econômico do modelo de cogeração proposto com o que já é praticado em países desenvolvidos.

Na sequência, o estado da arte apresenta trabalhos que envolvem o comportamento dos sistemas de cogeração associado a incentivos governamentais praticados nos países de origem dos pesquisadores. Essa segmentação é importante, pois, em muitos países, os modelos só se tornam economicamente viáveis com a diferenciação tributária entre os sistemas de geração de energia eficiente frente aos meios tradicionais.

Por fim, as melhores práticas para implementação de sistemas de cogeração com aplicação em supermercados são apresentadas. O ramo de alimentos tem como característica o alto consumo de energia elétrica em função da constante necessidade de refrigeração dos alimentos. Essa área de implementação foi a mesma utilizada no estudo de caso apresentado nesse trabalho.

2.1. A COGERAÇÃO

O crescimento da atividade econômica em países desenvolvidos e emergentes, associado com o desenvolvimento constante de produtos que necessitam cada vez mais eletricidade em seu processo de fabricação, culminam em um aumento exponencial do consumo de energia elétrica no planeta (Isa, Tan e Yatim, 2017).

Além disso, os problemas com energia estão cada vez mais presentes, em função dos desequilíbrios ambientais, aumento populacional e do padrão de vida em todo o globo (Ibrahim et al., 2014). A decadência da infraestrutura de distribuição e problemas com segurança são fatores que pressionam para pior o problema da energia mundial (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Tehrani et al., 2013 e Angrisani, Roselli e Sasso 2012).

Apesar dessas questões, uma maior demanda por energia pode ser aliviada com o aumento da eficiência dos sistemas de geração, que proporcionam maior sustentabilidade e uma produção de energia menos danosa ao meio ambiente (Ibrahim et al., 2013).

Desse modo, métodos mais eficientes e menos custosos para geração de energia elétrica são cada vez mais utilizados. Diante desse quadro, é preciso pensar em alternativas que respondam à necessidade de expansão e diversificação do parque gerador elétrico nos países; e é nesse contexto que estão inseridas as pequenas centrais geradoras e os sistemas de cogeração de energia.

A literatura apresenta diversos trabalhos envolvendo motores alternativos a gás natural associados as mais variadas tecnologias de *chiller* por absorção. Os motores têm como principal função a produção de eletricidade, já os *chillers* por absorção possuem a capacidade de “transformar” o calor rejeitado pelo motor a combustão interna (MCI) em refrigeração; este último, com alto valor agregado para qualquer empreendimento (Bassols et al., 2002).

Outro ponto importante é a baixa relação C/H do gás natural, que contribui para uma baixa emissão de CO₂ se comparado a outros combustíveis de origem fóssil, como o diesel.

A maioria dos resultados encontrados pelos pesquisadores direcionam para uma alta eficiência energética, fornecimento de água a temperaturas ideais para um bom funcionamento do sistema de refrigeração ou aquecimento, e consequente redução da conta de energia elétrica dos empreendimentos simulados (Ackermann, Andersson e Soder, 2001; Sugiarta et al., 2009; Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Colonna e Gabrielli, 2003).

As diversas tecnologias existentes para implementação em sistemas de cogeração de energia proporcionam a utilização desse modelo em uma série de aplicações residenciais, comerciais ou industriais (Medrano et al., 2008). Os motores a combustão interna (MCI) se destacam entre as principais tecnologias utilizadas nesses sistemas pois possuem um preço razoável para aquisição, além da eficiência na geração da energia (Isa, Tan e Yatim, 2017).

Moussawi, Fardoun e Louahlia (2017), apresentaram os principais benefícios para aplicação de sistemas de cogeração e trigerção. Eles classificaram as principais tecnologias utilizadas, incluindo os motores principais, com funcionamento através da combustão interna a gás natural, vapor, entre outros. Baseado em cargas elétricas diferentes, os autores avaliaram os modelos e indicaram as melhores escolhas para implantação dos sistemas em um estudo de caso.

Além de fazer uma análise global dos sistemas de cogeração, envolvendo diversos equipamentos, os autores destacaram que apesar da parte técnica e ambiental ser considerada na escolha do tipo de tecnologia que será implantada ao sistema, os benefícios econômicos frequentemente são o quesito principal, a menos que leis governamentais direcionem a tomada de decisão.

Çakir, Çomakli e Yuksel (2012), estudaram a aplicação de um sistema de cogeração em um hospital na Turquia, com o objetivo de reduzir os custos com o uso da eletricidade e diminuir a dependência externa por energia no empreendimento. O modelo apresentado é constituído por um motor a gás natural com 1240 kW de potência, que produziu aproximadamente 68% da energia demandada pelo hospital.

Os resultados encontrados demonstram um aumento da eficiência energética em torno de 30%, com a redução substancial dos gastos com eletricidade. Ao mesmo tempo, ressalta que a eficiência do motor está diretamente relacionada com a carga de funcionamento. O motor funcionando em plena carga (100%) possuiu eficiência de 36,7%, e com carga parcial (50%), eficiência de 31%. Os autores finalizam com a viabilidade econômica da implantação do modelo, além mostrar ser ambientalmente favorável.

Wang, J., Wu, J., e Wang, H. (2015) estudaram duas configurações de planta de cogeração, uma com MCI (motor de combustão interna) e *chiller* por absorção e outra com energia solar e *chiller* por absorção. Os resultados mostraram melhor desempenho na configuração com o MCI e o risco sistêmico do uso da irradiação solar no sistema de cogeração.

Bidini et al (1998), pesquisaram sobre a implantação de um sistema de cogeração na universidade de Perugia, Itália. O modelo apresentando propôs a utilização de um MCI a gás natural com 1 MW de potência e o aproveitamento do calor residual associado a água de resfriamento do motor, para utilização nos meses de inverno.

Os resultados apresentados após 15 meses de pesquisa demonstraram que o tempo de retorno do investimento não era atrativo para o empreendimento, mas a introdução de um sistema de refrigeração por absorção (ARS) reduzia o período de retorno, tornando-o mais atrativo; mesmo considerado os altos valores dos ARS comercializados naquele período.

Rocha, Andreos e Simões-Moreira (2012) associaram o aumento da utilização de sistemas de cogeração e trigeração com ao crescimento da rede de distribuição de gás natural junto com as novas políticas de incentivo e regulação no Brasil. A pesquisa foi realizada abrangendo dois modelos, um com uma microturbina e outro com motor alternativo de combustão interna, ambos operados a gás natural. O grande destaque em seus resultados foram os parâmetros de operação dos modelos simulados, com destaque para a média de 44,2% de PES (*Primary Energy Saving*).

Wang e Wu (2015) estudaram sistemas de trigeriação com *chillers* por absorção de efeito misto (simples e duplo efeito). Os modelos foram simulados no software MATLAB. O resultado mais determinante foi que os sistemas de trigeriação com *chillers* de efeito misto possuem melhor desempenho que os sistemas com *chiller* por absorção de simples efeito.

Já Oluleye et al (2016) indicaram *chillers* por absorção como uma das formas de aumentar a eficiência energética em uma refinaria, aproveitando os gases exaustos até então rejeitados na atmosfera. A modelagem apresentada mostra um incremento de 33% do sistema energético (energia útil recuperada) explorando todas as fontes de calor rejeitado.

Ebrahimi e Keshavarz (2012) utilizaram a *lógica fuzzy* e a metodologia *grey incidence* para decidir entre diversos tipos de motores (diesel, gás natural, vapor, etc) e dezesseis critérios de avaliação, qual a melhor opção para utilização de sistemas de trigeriação em residências no Irã. Os critérios envolveram questões técnicas, econômicas e ambientais.

Os resultados apresentados mostram que o método apresentado é capaz de determinar as melhores configurações, atendendo a todos os critérios apresentados, mesmo sendo adicionado cinco diferentes condições de clima. O grande destaque foi para os motores de combustão interna a gás natural, que apresentaram maior eficiência para geração da energia, com redução da emissão do CO₂ em até 40%, se comparado aos meios tradicionais de geração da energia.

Bianco et al (2016) fizeram uma análise de viabilidade de uma central de cogeração com o objetivo de reduzir os custos com energia através de indicadores associativos (técnicos e financeiros de forma conjunta). Para os autores, há uma deterioração dos índices de investimento após determinada produção de energia em função do excesso de calor desperdiçado que não pode ser aproveitado.

Os resultados encontrados indicam que com o aumento da temperatura externa nos meses do verão, a eficiência exérgica tende a diminuir em função da concomitante queda da produção energética útil. Ao mesmo tempo recomendam o investimento em cogeração, principalmente se houver um cenário de incerteza e aumento do preço da energia comercializado pela concessionária.

Huicochea et al (2011) estudaram o sistema de trigeriação em diferentes ambientes de temperatura. Os modelos foram baseados em MCI a gás natural e *chiller* por absorção de duplo efeito. Os pesquisadores programaram um simulador termodinâmico em MATLAB com o objetivo de provar a eficácia dos sistemas e do modelo matemático desenvolvido.

Os resultados encontrados mostraram a eficiência do MCI quando a mesma é utilizada somente para geração de eletricidade, porém, quando utilizada no sistema de trigeriação há um aumento substancial do seu rendimento. Os autores concluem que os MCI devem ser utilizados em plena carga, além de recomendar o uso desses motores em sistemas de cogeração como alternativa tecnológica para melhoria da eficiência energética.

Sun (2008), fez uma análise técnica e econômica de um sistema de cogeração acionado por motor alternativo de combustão interna a gás natural e *chiller* por absorção. Entre os resultados encontrados, destaca que o baixo preço do gás natural é determinante para a viabilidade econômica do modelo. O autor conclui que o sistema de cogeração com motor a gás possui o menor custo se comparado aos sistemas tradicionais que aproveitam o calor residual.

Popli, Rodgers e Eveloy (2013) fizeram um estudo técnico e econômico utilizando o calor residual dos *chillers* por absorção como forma de aumentar o rendimento das turbinas a gás (através da redução da temperatura do ar admitido no compressor) em ambientes de muita umidade no Oriente Médio. As simulações foram realizadas para aplicação na indústria do óleo e gás da região.

Os resultados encontrados mostram que 17 MW de calor residual da turbina a gás pode fornecer 12,3 MW em refrigeração, além do modelo de cogeração proposto proporcionar um aumento da potência da turbina em 23,2% e da eficiência energética do sistema em 13%. Os autores concluem que em condições menos adversas, o calor residual proveniente dos *chillers* pode ser utilizado em outras aplicações, como por exemplo para refrigeração dos escritórios na planta.

Ochoa et al (2014) fizeram um estudo energético e exergético de um sistema com motor de combustão interna a gás natural com 30 kW de potência, *chiller* por absorção de 10 TR, operando com Brometo de Lítio (LiBr), trocador de calor e torres

de resfriamento. Foi desenvolvido um algoritmo e modelagem no EES (*Engineering Equation Solver*) para analisar os parâmetros de funcionamento e determinar a eficiência dos equipamentos envolvidos no modelo.

O estudo foi focado na análise de qual componente ocorre maior destruição de exergia e apresentou os seguintes resultados (do maior para o menor): microturbina > trocador de calor > torre de resfriamento > *chiller* por absorção. Os autores concluem que quanto maior a potência utilizada na turbina, maior será a eficiência energética do sistema e, conseqüentemente, maior será o potencial para o sistema de cogeração.

Nos sistemas de cogeração ou trigerção de energia com *chiller* por absorção, motores de combustão interna a gás, funcionando em plena carga, tendem a fornecer calor a uma temperatura constante. Quando se utiliza outra fonte de energia, pode haver variação da temperatura da fonte e comprometer o desempenho total do sistema.

Jayasekara e Halgamuge (2014) desenvolveram um modelo matemático para estudar o efeito combinado do *chiller* por absorção que funciona com uma ou duas fontes de energia com forte variação na temperatura. Os pesquisadores desenvolveram um diagrama esquemático com as alterações propostas para o funcionamento do modelo, que funciona com *chiller* por absorção que utiliza o LiBr (brometo de lítio) como absorvente e água como refrigerante.

Os resultados apresentados direcionam para um aumento da eficiência do *chiller* proposto em 11%, se comparado com os *chillers* tradicionais. Os autores não recomendam a utilização desse equipamento em sistemas que operam com o vapor, em função de não haver muita variação da temperatura dessa fonte de energia. Os autores concluem com a recomendação de utilização dos *chillers* com LiBr, pois são os mais utilizados no mercado local.

Já Arsalis (2012) estudou células de combustível com *chiller* de absorção em um sistema de 100 kW para um navio comercial que demanda energia elétrica e térmica para seu funcionamento. O modelo proposto opera com *chiller* por absorção de simples e duplo efeito, e é comparado com sistemas convencionais de cogeração de energia.

Os resultados encontrados no estudo de caso provam a eficiência do sistema e indica que o *chiller* por absorção satisfaz toda a demanda térmica dos compartimentos refrigerados do navio. Os *chillers* que funcionam com LiBr forneceram aproximadamente 128 kW em refrigeração e os que funcionam com Amônia, 65 kW. O autor conclui que o modelo proporciona alta redução na emissão de CO₂, se comparado aos meios tradicionais de geração de energia em navios.

Sturm et al (2012) estudaram um caso de cogeração com *chiller* por absorção substituindo o diesel por biogás em uma cervejaria. Como premissa de estudo, consideraram que o empreendimento demanda 140 kW em energia térmica durante 16 horas por dia; além de só utilizar a eletricidade produzida e vender o excedente à concessionária.

Seus resultados mostraram que a capacidade de refrigeração não variou frente à mudança de combustível e recomendaram o *chiller* por absorção como a melhor opção para aumento da eficiência energética, além de reduzir a emissão de poluentes. Os autores destacam que sem o apoio governamental, sistema de cogeração com biogás tendem a não ser economicamente favoráveis.

Os trabalhos apresentados pelos pesquisadores nesse tópico buscaram a viabilidade de sistemas de cogeração em aplicações diversas e com combustíveis variados. Nenhum dos trabalhos apresentados nesta sessão da revisão bibliográfica teve como foco a aplicação de modelos de cogeração baseados em motor alternativo a gás natural e *chiller* por absorção com foco em supermercados.

2.2. O MEIO AMBIENTE E A COGERAÇÃO

No mundo moderno, principalmente nos países onde a vanguarda da geração da energia se faz presente, os diversos meios de geração não são aplicados sem um forte compromisso com o meio ambiente. Enquadrar esses projetos de engenharia com rigorosos requisitos ambientais, regras de incentivo difusas e diversos riscos sistêmicos envolvidos tem sido um desafio; mas os resultados são favoráveis.

Segundo Flórez-Orrego, Silva e Oliveira Jr (2014), a geração da eletricidade somente a gás natural pode emitir 477,22 g CO₂ / kWh (3ª maior emissão se comparado a outros meios de geração na matriz energética brasileira). No entanto, associando essa informação a sistemas de cogeração ou trigeração, pode-se inferir uma grande oportunidade de contribuição ambiental, já que a quantidade de CO₂ evitada em sistemas de cogeração é proporcional à quantidade de energia aproveitada (Çakir, Çomakli e Yuksel, 2012).

Maidment e Prosser (2000) aplicaram modelos de cogeração para implantação em frigoríficos, seguindo o mesmo padrão de estudo já apresentado por outros pesquisadores nessa dissertação. O grande destaque foi sua inovação quanto a aplicação de um indicador ambiental, o TEWI (Total Equivalent Warming Impact). O baixo teor de TEWI encontrado está alinhado com outros indicadores ambientais já apresentados, que sugerem os sistemas de cogeração como excelentes modelos para diminuir a emissão de gases relacionados ao aquecimento global.

Chen (2014) estudou um sistema de trigeração com motor de combustão interna de 1747 kW e *chiller* por absorção utilizando o LiBr como absorvedor. O estudo foi realizado em dois cenários, o primeiro com capacidade de carga reduzida e o segundo com carga máxima no MCI (100%). Em ambos os cenários foram medidas a performance que cada componente do modelo, a cada hora do dia, durante todo o período de estudo.

Nos resultados apresentados, o destaque foi para a redução da emissão de CO₂ chegou a 66,7% no primeiro cenário e 71,5% no segundo cenário. Um estudo parecido, com a mesma configuração de MCI e *Chiller*, em regiões onde a geração de energia é mais limpa, ou seja, a emissão primária de CO₂ já é pequena; encontra-se redução na emissão de CO₂ por sistema de trigeração (Fong e Lee, 2015).

Maidment e Tozer (2002) destacaram que o Reino Unido tem como objetivo reduzir os gases de efeito estufa em no mínimo 20% até 2010. Para atingir esse planejamento, naquele país foi criado um imposto chamado CCL (Climate Change Levy), que é uma taxa cobrada para grandes consumidores de energia, mas que é isenta para os empreendimentos que utilizam sistemas de geração de eletricidade eficientes e ambientalmente favoráveis, tal como a cogeração de energia.

Ge, Tassou e Suamir (2013) realizaram um estudo experimental para implantação de um sistema de cogeração que utiliza o CO₂ como refrigerante. O trabalho faz uma série de provocações sobre a importância de se buscar a total utilização desse poluente, que possui excelentes propriedades termo físicas e de transferência de calor, além da inegável relação com o efeito estufa. Os autores destacaram trabalhos que indicaram que a emissão do CO₂ em modelos que o utilizam como refrigerante, se forem bem dimensionados, pode levar a zero a emissão desse poluente na atmosfera.

Mura e Innamorati (2015), estudaram a aplicação de um sistema de cogeração com bombas de calor e *chiller* por absorção em uma Universidade de Cagliari, na Itália. O objetivo principal foi melhorar a eficiência energética no empreendimento, que estava passando por uma crise financeira em função da situação econômica naquele país. Os resultados apresentaram uma redução de 40% na emissão de poluentes e indicou que o modelo propõe uma eficiência energética total de aproximadamente 77% (38,5% elétrica e 39,2% térmica).

Até mesmo em projetos de implantação de sistemas automotivos, sistemas de refrigeração por absorção (ARS) conseguem contribuir com o aumento da eficiência energética e redução na emissão de poluentes (Manzela et al., 2010).

Os sistemas de cogeração se mostraram ambientalmente favoráveis em praticamente todos os estudos apresentados nesta sessão. No entanto, não foi encontrado trabalhos que partam de modelos similares ao proposto nessa dissertação e que sejam aplicados em países onde a matriz energética é pouco poluente, como o Brasil.

Essa linha de questionamento é importante, pois responde a seguinte pergunta: “Já que os sistemas de cogeração são ambientalmente favoráveis em países com alto grau de emissão de poluentes em sua matriz energética, como será o comportamento desses modelos em países que possuem uma produção mais limpa de eletricidade?”

2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO

Quando há a necessidade para tomada de decisão quanto à implantação ou não de sistemas de cogeração, a análise de investimentos é crucial para direcionar os melhores caminhos. Os trabalhos referenciados a seguir seguem essa linha de pesquisa.

Alexis e Liakos (2013) apresentaram um estudo de caso indicando a melhor configuração de cogeração a ser utilizada em um hospital na Grécia. Como método de pesquisa, associaram as estações do ano à necessidade de consumo de energia em cada hora do dia. Os autores destacaram que os hospitais são grandes candidatos à implantação de sistemas de cogeração de energia em função da grande demanda anual por eletricidade.

Os resultados encontrados mostram uma redução no custo da energia em 32,4%, VPL (valor presente líquido) positivo e TIR (taxa interna de retorno) de 19% para os 20 anos de vida útil do sistema. Os autores ressaltaram também o aumento exponencial no consumo do gás natural durante os meses de inverno.

Sun (2008) fez um estudo experimental para implantação de sistemas de cogeração com motor de combustão interna a gás natural em dois locais com demandas energéticas diferentes. O autor utilizou em seu modelo dois tipos de *chillers*, um por absorção e outro por compressão pois considera que o custo com a manutenção desses modelos é menor se comparado com os sistemas tradicionais que utilizam calor residual.

Os resultados apresentados apontam que o preço do gás natural é determinante para a viabilidade econômico financeira do projeto, além de apresentar uma média de 37% no PES (*Primary Energy Saving*). O autor conclui recomendando seus modelos para implantação em casos reais e destaca o *payback* de 4,52 anos e 2,65 anos, nas cidades Chinesas de Jiangsu e Sichuan.

Maidment, Zhao e Riffat (2001) investigaram a viabilidade prática e econômica de um modelo de cogeração utilizando um sistema combinado de turbinas a gás natural em um empreendimento no Reino Unido. Para minimizar o risco de falha, propôs um sistema com duas centrais individuais e independentes, sendo que cada

uma atendeu a 50% da carga demandada pelo estudo de caso. Todo o custo de capital e uma análise de investimento completa para implantação do modelo foi apresentado.

Os resultados encontrados demonstram uma redução de até 500.000 kWh de energia por ano, o que significa uma redução substancial com o gasto com eletricidade no empreendimento. A análise de investimento direciona para um *payback* de 4,2 anos para o cenário operando com baixos preços do gás natural, mas que pode ser reduzido para 3,96 anos se o modelo funcionar com uma maior quantidade de horas por dia, além de vender a energia excedente produzida à concessionária de energia.

Konstantakos et al (2013) desenvolveram um modelo para auxílio na implantação de sistemas de cogeração, envolvendo as variáveis relacionadas ao subsídio governamental, o preço do gás natural e da energia elétrica em diferentes cenários da realidade instável da economia na Grécia.

O objetivo principal do estudo foi auxiliar no planejamento energético daquele país e direcionar para execução os projetos economicamente favoráveis. Os autores destacaram o ganho em escala relacionado ao tamanho do sistema de cogeração, ou seja, quando maior o projeto, maior a lucratividade. Esse comportamento se deu principalmente pelos maiores incentivos aplicados a projetos de grande porte.

Os resultados encontrados indicam a recomendação de investimento mesmo em cenários adversos, ao ponto de apresentar modelos viáveis mesmo que o preço do gás natural dobrando. Os autores concluem ressaltando o *payback* de investimento curto (máximo de 3 anos) em todos os cenários apresentados.

Os pesquisadores apresentados nessa sessão apresentaram bons resultados que direcionam economicamente para a implantação dos modelos de cogeração. A grande questão é que a maioria dos sistemas apresentados foram aplicados em um ambiente onde são praticados fortes incentivos governamentais, conseqüentemente em cenários de baixo risco para implantação.

Desse modo, percebe-se uma lacuna de trabalhos que respondam como será o comportamento financeiro de sistemas de cogeração, baseados em motores

alternativos a gás natural e *chiller* por absorção com foco em supermercados, em países com poucos incentivos de investimento e com grande incerteza na estabilidade no preço da eletricidade e do gás natural.

2.4. INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS PARA COGERAÇÃO

A decisão de implantação de um projeto de cogeração ou trigerção de energia é delicada, frente as mais diversas variáveis apresentadas. A adequação dos projetos à legislação local para participação nos incentivos governamentais é um dos pontos mais importantes, pois está diretamente relacionado com a longevidade financeira das centrais geradoras.

Bassols et al (2002) relataram que os países que desejam conquistar posições de destaque com o uso eficiente da energia utilizando combustíveis fósseis, devem considerar os sistemas de cogeração ou trigerção. No entanto, esses modelos, em sua maioria, só são economicamente viáveis em situações de baixa oferta e alto custo da energia; associado a uma forte política de incentivo à implantação desse tipo de tecnologia.

Países da Europa e o Japão, utilizam a legislação como forma de incentivo e estímulo à implantação de sistemas de cogeração. Para muitos, esse tipo de metodologia para geração de energia elétrica já faz parte da estratégia para produção de energia mais eficiente (Marimón et al., 2011; Arteconi, Brandoni e Polanara, 2009; Cecchinato, Corradi e Minetto, 2010; Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Maidment e Prosser, 2000).

A Espanha, por exemplo, na década de 2011, trabalhou com uma política de aumento do preço da energia elétrica caso haja um aumento no preço do gás, dessa forma mantendo o incentivo em cogeração no caso de grandes oscilações no preço do combustível (Campos Celador et al., 2011).

Já o Japão, os sistemas de cogeração ou trigerção podem ser financiados a uma taxa de juros de 2,3% ao ano com um subsídio de 15% do investimento para plantas de larga escala (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

A grande questão é que a viabilidade dos sistemas que usam gás natural ou outro combustível fóssil, está diretamente relacionada ao preço do combustível, que flutua constantemente por questões internacionais e nem todo governo tem interesse ou poder político para subsidiar ou controlar esse tipo de oscilação (Palomino e Nebra, 2012).

Maidment et al. (1999), aproveitaram que os sistemas de cogeração fazem parte da estratégia ambiental no Reino Unido que visa a redução da emissão de poluentes e aumento da eficiência energética, para estudar a implantação desse sistema em um supermercado na região. O estudo destacou a enorme quantidade de energia direcionada naquele país para a indústria de alimentos, que necessita de refrigeração constante dos alimentos e das áreas de comercialização.

A metodologia consistiu em mapear os horários de maior necessidade de carga térmica e elétrica através de uma análise diária do comportamento energético do empreendimento. O trabalho foi apresentado em forma de dois estudos, sendo o primeiro envolvendo a adição de motor alternativo, que apresentou uma grande perda de energia por meio dos gases exaustos direcionados para a atmosfera.

No segundo estudo, um *chiller* por absorção foi adicionado ao sistema, que proporcionou uma economia de energia em mais de 20%, se comparado ao sistema original; e um retorno sobre o investimento de 6 anos, considerando a aquisição do motor a combustão e do *chiller*.

Muccillo e Gimelli (2014) analisaram um sistema de cogeração com motor de combustão interna a gás natural associando as premissas da lei local para o sistema ser considerado “de cogeração” e assim participar dos incentivos governamentais.

O projeto detalha as premissas incorporadas à lei, apresenta resultados financeiros favoráveis ao investimento, faz um balanço energético do sistema, além de indicar *chiller* por absorção como forma de incrementar mais ainda a eficiência energética do sistema, fornecendo refrigeração e transformando-o em um sistema de trigerção.

Zhou et al (2013) apresentam dois modelos matemáticos de trigerção com o objetivo de diminuir o custo total da geração energética de um hotel tradicional em

Pequim, China. Os autores concluem que em períodos de baixa demanda energética, deve-se operar o sistema sem a carga total ou com apenas um motor de combustão interna em funcionamento; para não haver desperdício na produção de energia.

Esse último artigo mostra como é importante haver uma legislação de incentivo atualizada, pois se houvesse um sistema de compensação, por exemplo, o projeto, que foi sobre dimensionado, poderia vender a energia excedente ao sistema de rede elétrica da região.

Nenhum dos trabalhos apresentados referenciados nessa revisão fez uma análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental de plantas de cogeração a gás natural direcionada para o sistema de compensação de energia elétrica e usufruindo dos benefícios da cogeração qualificada em micro e minigeração indicados pela legislação brasileira.

2.5. COGERAÇÃO EM SUPERMERCADOS

A análise energética e econômica de sistemas de cogeração em supermercados é uma atividade relativamente complexa pois inclui dois tipos de energia, a elétrica, que é utilizada na iluminação, funcionamento de computadores e diversos outros equipamentos; e a energia térmica, que pode ser utilizada para funcionamento do sistema de ar condicionado, refrigeração dos alimentos ou aquecimento dos ambientes (Marimón et al., 2011).

Uma enorme quantidade de energia nestes empreendimentos é direcionada para a carga térmica, que em supermercados, engloba os racks de baixa (RBT), média temperatura (RMT), além do ar condicionado. São nestes equipamentos (RBT e RMT) que estão localizados os alimentos congelados e resfriados, respectivamente; e devem funcionar 24 horas por dia, sem interrupção do fornecimento da carga.

Desse modo, o funcionamento e a gestão da energia destes equipamentos são componentes estratégicos para aumento da eficiência energética e da lucratividade deste tipo de empreendimento (Bassols et al., 2002 e Colonna e Gabrielli, 2003).

No que diz respeito à aplicação de forma efetiva, sustentável e consequente sucesso dos sistemas de cogeração de energia em supermercados, as pesquisas direcionam para a equalização de dois problemas principais: limitação da tecnologia do *chiller* por absorção e ineficiência de incentivos governamentais praticadas em alguns países.

Tratando de *chiller* por absorção, apesar dos modelos que operam com amônia e água fornecerem temperatura negativa, serem mais customizados e tradicionais se relacionados com os modelos que operam com brometo de lítio e água (Colonna e Gabrielli, 2003), os trabalhos apresentados por Maidment et al. (1999), Maidment, Zhao e Riffat (2001) e Marimón et al (2011) destacaram a dificuldade de encontrar tecnologias no mercado capazes de operar sistemas de cogeração de pequeno porte e de oferecer temperaturas negativas para atender aos racks de baixa temperatura.

A grande maioria dos *chillers* por absorção de pequeno porte operam com brometo de lítio e água, que é uma tecnologia mais padronizada, moderna e de menor custo, mas que só tem condições de fornecer temperaturas a partir de 5°C (Arteconi, Brandoni e Polanara, 2009; Maidment e Tozer, 2002).

Marimón et al (2011) estudaram a integração de um sistema de trigeração com o sistema de refrigeração por compressão em cascata já em funcionamento em um supermercado em Barcelona, na Espanha. Os autores desenvolveram um modelo sobre dimensionado com o objetivo de vender a energia produzida excedente à concessionária de energia.

Para encontrar resultados mais conservadores, os autores se basearam nos máximos preços do gás natural que foram praticados no mercado Espanhol, estimou os custos de manutenção do sistema, além de considerar os benefícios governamentais mínimos praticados naquele país. Também utilizaram o software *Cybermart* para auxiliar no dimensionamento do tamanho do modelo.

Através de simulações com o MCI funcionando com cargas de 25%, 50% e 100%, os autores concluíram que a viabilidade para implantação dos modelos está diretamente relacionada com os subsídios ofertados pelo governo, seja relacionado ao preço do gás natural, seja direcionado para os preços da energia produzida e

compensada no *grid*. Por fim, encontraram um *payback* de 4,5 anos no modelo funcionando em plena carga.

Arteconi, Brandoni e Polanara (2009), estudaram um sistema de cogeração e trigeração em um supermercado já em operação na Itália. Com o empreendimento já em funcionamento, utilizou como metodologia a implantação de um motor a combustão interna a gás natural e um *chiller* por absorção operando com brometo de lítio e água, como forma de substituir os equipamentos já existentes.

Os autores destacaram a preferência por estes tipos de equipamentos, pois possuem tecnologia mais contemporânea, são menos custosos, além desse tipo de *chiller* possuir maior COP (Coeficiente de Performance) que os *chillers* que operam com amônia e água. O motor a combustão interna utilizado nos modelos libera gases exaustos com temperaturas superiores a 250°C, ideais para utilização com sistemas por absorção.

Com o objetivo de atender a toda a carga térmica e elétrica do empreendimento, os resultados encontrados demonstram total viabilidade do sistema, redução substancial da conta de energia elétrica e retorno sobre o investimento de 7 anos.

Por fim, os pesquisadores demonstraram grande preocupação com o preço do gás natural e a legislação de incentivo naquele país, pois esses aspectos influenciam diretamente na viabilidade desse tipo de projeto, já que a geração de energia térmica (refrigeração) em supermercados é o principal custo energético nesse tipo de empreendimento.

Cecchinato, Corradi e Minetto (2010) estudaram o consumo da energia térmica e elétrica em um supermercado na Itália para implantação de um sistema de cogeração envolvendo bombas de calor e *chiller* por absorção. Os autores buscaram total otimização dos componentes com uma integração do modelo com o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (sigla em inglês HVAC), já em funcionamento no empreendimento.

Os autores focaram no estudo no segmento da alimentação, pois 25% do gasto em energia elétrica na Itália está relacionado a esse tipo de comércio e, em média, a refrigeração dos alimentos consome mais que 30% da energia nos

supermercados, mesmo em períodos de inverno. O modelo foi simulado para implantação em diferentes climas na qual o empreendimento é exposto durante o ano.

Os resultados apresentados foram encontrados através de uma modelagem matemática e do auxílio dos softwares *Energy Plus* e *Refprop*. Todas as simulações com o modelo trazem benefícios para melhor aproveitamento energético. A integração entre o sistema de refrigeração por absorção com o HVAC trouxe uma redução substancial do consumo de eletricidade.

De modo geral, os sistemas de cogeração de energia foram recomendados por praticamente todos os pesquisadores utilizados como referência nesse trabalho. Os modelos se apresentam como alternativa para redução no custo da energia em diversos empreendimentos estudados e localizados em países diferentes, através da produção de uma energia mais eficiente com reduzida emissão de poluentes; se comparado aos meios tradicionais de geração (Maidment et al, 1999; Arteconi, Brandoni e Polanara, 2009; Isa, Tan e Yatim, 2017; Sugiartha et al., 2009; Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Colonna e Gabrielli, 2003; Flórez-Orrego, Silva e Oliveira Jr., 2014).

Nenhum dos trabalhos apresentados nessa revisão seguiu uma abordagem ampla de pesquisa, com o desenvolvimento de indicadores técnico e financeiro, aplicação de um indicador ambiental; utilizando motores alternativos a gás natural e *chiller* por absorção com foco de aplicação em supermercados e usufruindo os incentivos governamentais praticados no mercado brasileiro.

CAPÍTULO 2

3. GÁS NATURAL

3.1. PERSPECTIVAS E RESERVAS

Como resultado das suas indiscutíveis e vantajosas características técnicas, econômicas e ambientais, o gás natural hoje é considerado um dos combustíveis do futuro, podendo o mercado ser comparado com o de petróleo em um futuro não tão distante (EIA, 2018).

Ofertas globais do gás natural (GN) estão se expandindo rapidamente, em função da revolução do gás de xisto nos Estados Unidos (EUA) e das novas descobertas de grandes poços no Qatar (Figura 1). Com esses dois *players* globais contribuindo com um aumento da oferta desse combustível, o mercado do GN se tornará mais integrado e praticará menores preços para comercialização (BP Energy Outlook, 2018).

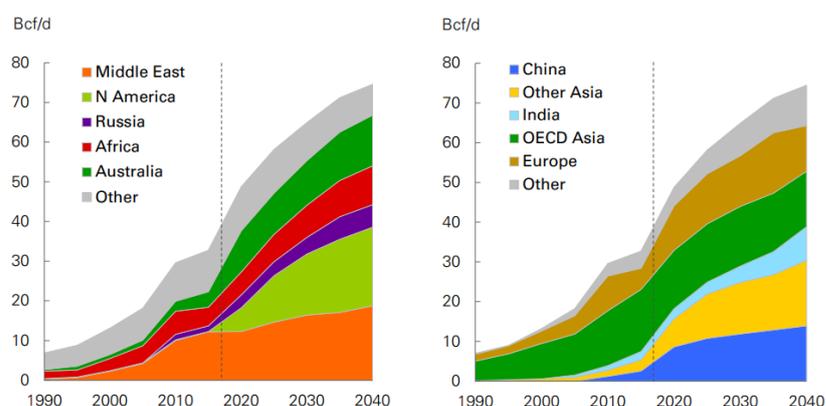


Figura 1 – Projeção para exportação e importação do GN por região

Fonte: BP Energy Outlook (2018)

No que diz respeito a demanda por GN, um fator importante para o crescimento do consumo desse combustível está na China, que já está substituindo o carvão mineral pelo GN em todo o seu processo produtivo. Outro grande mercado consumidor é a Europa, que continua sofrendo com invernos rigorosos e

necessitam do GN para aquecimento residencial de toda região (BP Energy Outlook, 2018).

Mesmo sendo acessível à uma grande variedade de agentes de mercado, o GN ainda continua sendo muito sensível a mudanças de consumo, em função de possíveis problemas de oferta desse combustível (problemas estes, principalmente, causados por questões geopolíticas). No entanto, as projeções do BP Energy Outlook (Figura 2) mostram um inabalável crescimento global do consumo, produção e comercialização do gás natural.

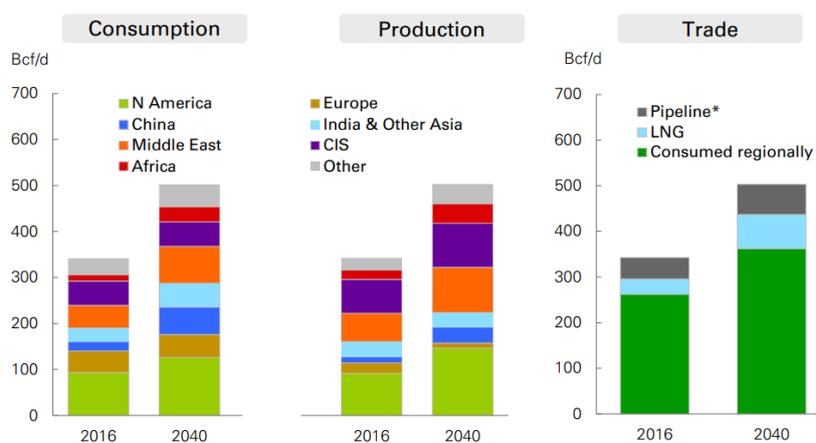


Figura 2 – Projeção do consumo, produção e comercialização do GN

Fonte: BP Energy Outlook (2018)

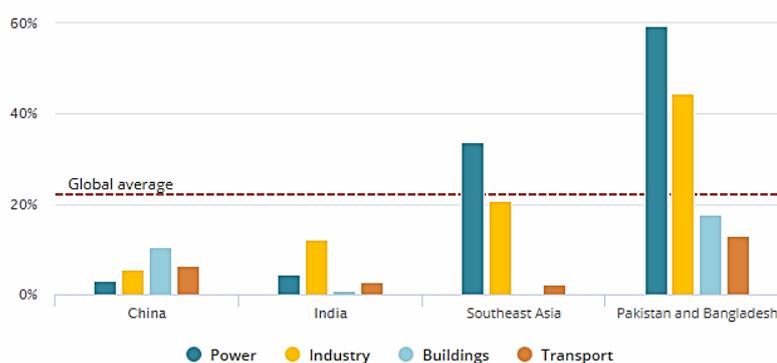


Figura 3 – Demanda por gás natural na Ásia emergente até 2040

Fonte: EIA (2018)

Esforços para implantação de políticas de combate à poluição atmosférica e uso da energia de forma mais eficiente tem sido grandes impulsionadores do consumo do gás natural (EIA, 2018). Uma região de destaque em função do seu

grande consumo desse combustível é a Ásia emergente, que continuará com uma forte demanda por GN até 2040, conforme Figura 3.

Dentre os diversos países consumidores de GN, a China se destaca pelos fortes esforços políticos para melhorar a qualidade do ar naquela região. Segundo a EIA (2018), a demanda por esse combustível em 2040 vai ultrapassar 100 bilhões de metros cúbicos e a maior parte se deve ao consumo chinês. Isso colocará a China como maior consumidor de GN do mundo, com as importações líquidas se igualando ao nível da União Europeia em 2040. A figura 4 mostra essa projeção.

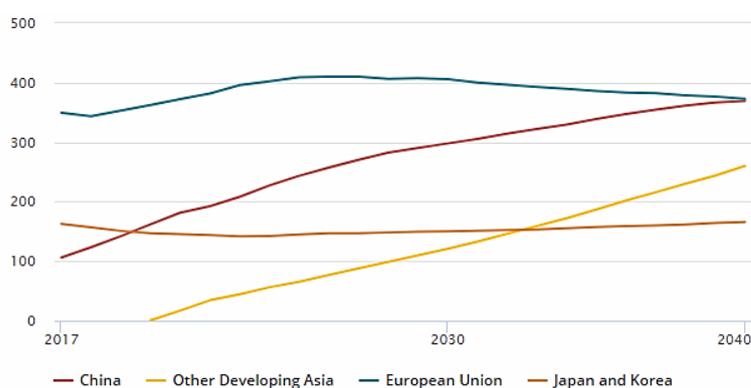


Figura 4 – Demanda e produção de gás natural

Fonte: EIA (2018)

Ao contrário de outros combustíveis fósseis, o gás natural continua a fazer incursões em quase todas as economias avançadas. Outro grande destaque é a Coreia do Sul, que possui grande demanda por GN em função da diminuição e restrição no uso da energia nuclear e do carvão em seu leque de produção energética (EIA, 2018).

Os Estados Unidos da América (EUA) serão responsáveis por 40% do crescimento total da produção de gás até 2025, em função do aumento do consumo do gás natural e a estabilização do mercado do gás de xisto, que proporcionará preços acessíveis e alta oferta do combustível (EIA, 2018).

Uma projeção da demanda e produção do gás natural de forma global, no intervalo de 2017 a 2040, considerando as novas políticas de incentivo para uso desse combustível é apresentada na Figura 5. Todas as regiões catalogadas apresentam crescimento durante o período estudado.

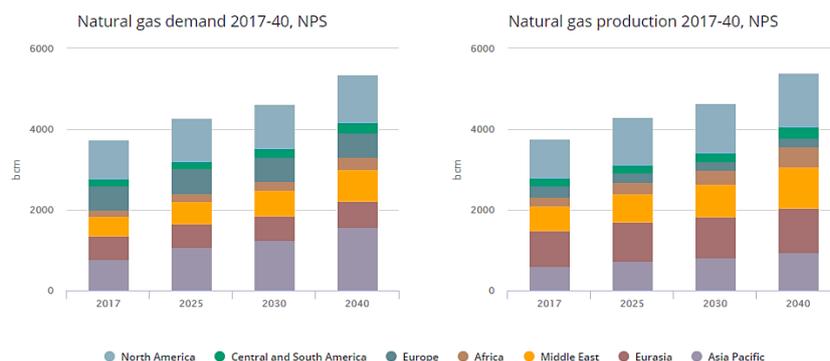


Figura 5 – Demanda e produção de gás natural

Fonte: EIA (2018)

Por fim, o cenário mundial aponta para um aumento da demanda global por energia em todos os principais setores da indústria, mesmo sendo observado um crescimento mais lento do consumo energético até 2040. O grande destaque está nas economias emergentes Asiáticas, que representarão 70% do crescimento do consumo da energia, além do gás natural e da eletricidade, que representarão 2/3 do fornecimento de toda a energia industrial em 2040 (Figura 6).

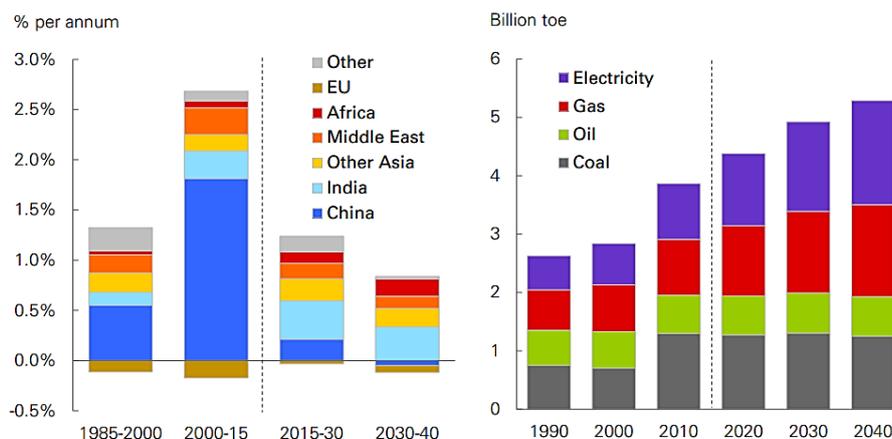


Figura 6 – Crescimento (%) do consumo da energia x consumo energético por combustível na indústria

Fonte: BP Energy Outlook (2018)

3.2. CONSUMO E PRODUÇÃO DE GÁS NATURAL NO BRASIL

Nos últimos anos, o Brasil passou por crises no fornecimento de energia elétrica, em função de variados problemas ambientais, principalmente a falta de

chuvas em regiões de produção hidrelétrica; o que ocasionou uma maior utilização do gás natural nas termelétricas, indústria e por produtores que participam da geração distribuída (Leal, Rego e Ribeiro, 2019).

Em 2018, o aproveitamento da produção do gás natural no Brasil, em meses de alto consumo, alcançou 97,4% do volume total produzido; o que representa uma produção média de 65,2 milhões de metros cúbicos por dia (ANP, 2018). Esse nível de eficiência e aproveitamento está relacionado ao pré-sal, que voltou a ser a grande estrela do mercado de óleo e gás brasileiro (ANP, 2018).

Leal, Rego e Ribeiro (2019), indicaram que o uso do gás natural no Brasil deve se intensificar, com a diminuição do uso de termelétricas que utilizam óleo combustível e carvão mineral; além de servir como espinha dorsal para sustentar o desenvolvimento da energia solar e eólica no Nordeste, mitigando a intermitência associadas a essa forma de produção de eletricidade.

4. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Seguindo o pensamento de países desenvolvidos, o Brasil enxerga a cogeração como um método para geração de energia que contribui com a racionalidade energética do país, proporcionando melhor aproveitamento e menor consumo das fontes de energia; se comparado com a geração individual da eletricidade e calor (ANEEL, 2006).

Tanto os modelos simulados na sessão dos indicadores para avaliação geral de sistemas de cogeração, quanto os apresentados nos três cenários do estudo de caso dessa dissertação, foram validados e enquadrados à legislação vigente no Brasil. O objetivo foi certificar que, como gerador qualificado, os projetos estão aptos para aproveitar os benefícios e incentivos da legislação pertinente a cogeração.

4.1. RESOLUÇÃO 235 DE 2006 – QUALIFICAÇÃO DA COGERAÇÃO

A Resolução 235, de 14 de Novembro de 2006, estabelece os requisitos para a qualificação das centrais termelétricas cogedoras, além de descrever conceitos e critérios para aplicação da legislação de incentivo direcionada ao mercado de produção de energia no Brasil.

O termo 'Qualificado' é um atributo concedido aos produtores de eletricidade que atendem aos requisitos da resolução, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo a cogeração de energia.

Para a central geradora se tornar qualificada, ela deve atender os requisitos apresentados pelas Equações (1) e (2):

$$\frac{Et}{Ef} \geq 15\% \quad (1)$$

$$\frac{\left(\frac{Et}{Ef}\right)}{X} + \left(\frac{Ee}{Ef}\right) \geq Fc (\%) \quad (2)$$

Onde:

III - Energia da fonte (Ef): energia recebida pela central termelétrica cogedora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, com base no conteúdo energético específico, que no caso dos combustíveis é o Poder Calorífico Inferior (PCI);

IV - Energia da utilidade eletromecânica (Ee): energia cedida pela central termelétrica cogedora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontando da energia bruta gerada o consumo em serviços auxiliares elétricos da central;

V - Energia da utilidade calor (Et): energia cedida pela central termelétrica cogedora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontando das energias brutas entregues ao processo as energias de baixo potencial térmico que retornam à central;

VIII - Fator de cogeração (Fc %): parâmetro definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogedora, o qual aproxima-se do conceito de Eficiência Exergética;

IX - Fator de ponderação (X): parâmetro adimensional definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, obtido da relação entre a eficiência de referência da utilidade calor e da eletromecânica, em processos de conversão para obtenção em separado destas utilidades.

(Art. 3, parágrafos III, IV, V, VIII e IX, ANEEL nº 235/2006).

Os resultados dessas equações de qualificação devem estar enquadrados com os requisitos que constam também na Resolução 235/2006 da ANEEL; mas que variam conforme combustível ou método utilizado para recuperação de calor, conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Critérios de qualificação apresentada pela legislação da ANEEL

Fonte / Potência elétrica instalada	X	Fc (%)
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais Combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor Recuperado de Processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Fonte: Resolução 235 de 2006 (ANEEL)

4.2. RESOLUÇÃO 482 DE 2012 e 687 DE 2015 – MICRO E MINI GERAÇÃO

A Resolução 482, de 17 de Abril de 2012, posteriormente atualizada pela Resolução 687 de 24 de Novembro de 2015, discorre sobre as condições gerais para o acesso de micro ou mini geradores qualificados aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia.

Essas resoluções foram as primeiras que consideraram a aplicação do sistema de compensação de energia no Brasil, que antes era desencorajado ou realizado

de forma clandestina em sistemas isolados (SILVA, 2016). A atualização para a Resolução 687 de 2015 trouxe importantes alterações para efeito de diferenciação entre o micro e mini gerador e descreveu melhor o sistema de compensação de energia.

O primeiro destaque foi a nova classificação das centrais geradoras de energia no Brasil. Se a potência instalada for menor ou igual a 75 kW, elas serão denominadas *Micro Geradoras*; as que possuem potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fonte hídrica, ou até 5 MW para demais fontes, são chamadas de *Mini Geradoras*.

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

(Art. 2, parágrafos I e II, ANEEL nº 687/2015).

A compreensão do sistema de compensação de energia foi melhorada, com o objetivo de facilitar a utilização dos créditos pelos produtores que consomem menos eletricidade do que produzem. Além dos micro ou mini produtores de energia, empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras ou caracterizadas como geração compartilhada e/ou autoconsumo remoto, podem aderir ao sistema de compensação.

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;

(Art. 2, parágrafo III, ANEEL nº 687/2015).

Podem aderir ao sistema de compensação de energia elétrica os consumidores responsáveis por unidade consumidora:

I – com microgeração ou minigeração distribuída;

II – integrante de empreendimento de múltiplas unidades consumidoras;

III – caracterizada como geração compartilhada;

IV – caracterizada como autoconsumo remoto.

(Art. 6, parágrafo I,II,III e IV, ANEEL nº 687/2015).

A validade dos créditos produzidos, que serão utilizados no sistema de compensação de energia, foi estendida de 36 para 60 meses, proporcionando um melhor planejamento do gestor para produção e uso da eletricidade da planta geradora.

§1º Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses.

(Art. 6, inciso 1º, ANEEL nº 687/2015).

A utilização dos créditos deve estar atrelada ao posto tarifário que incidiu no momento da geração (ponta ou fora de ponta), ou seja, a energia produzida de forma excedente e transformada em créditos em horário de ponta (P) deve ser utilizada das 18:00 às 21:00 h. Se a geração excedente foi realizada em horário fora de ponta (FP), o crédito deve ser utilizado no mesmo período.

Caso excepcionais em que o gerador utilize créditos em postos tarifários diferentes (P para FP ou vice-versa), deve-se aplicar um fator de ajuste da tarifa (R\$/kWh), sendo FP/P, para utilização do crédito criado em horário fora de ponta em horário de ponta ou P/FP; caso o produtor precise usar créditos gerados no horário de ponta para períodos em que a bandeira tarifária é a fora da ponta.

XI - em cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica, a compensação deve se dar primeiramente no posto tarifário em que ocorreu a geração e, posteriormente, nos demais postos tarifários, devendo ser observada a relação dos valores das tarifas de energia – TE

(R\$/MWh), publicadas nas Resoluções Homologatórias que aprovam os processos tarifários, se houver;

(Art. 7, parágrafo XI, ANEEL nº 687/2015).

A aplicação do conceito autoconsumo remoto permite ao empreendimento possuir uma unidade exclusivamente geradora, podendo as unidades consumidoras estarem localizadas em um local diferente da geração. Essa informação é importante, pois o estudo de caso aplicado nessa dissertação foi realizado em um supermercado, que pela sua característica de possuir uma série de filiais, pode usufruir dessa normativa no seu planejamento de produção energética.

VIII – autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

(Art. 2, parágrafo VIII, ANEEL nº 687/2015).

A contabilização dos créditos relacionados a eletricidade produzida pelo gerador é determinada em termos de energia ativa, ou seja, a quantidade produzida e que será compensada não está sujeita a alterações no preço da energia elétrica. Essa informação da legislação é muito importante e serve como incentivo à produção, principalmente se tratando do Brasil, que ultimamente sofre com constantes aumentos nas tarifas de eletricidade, o que proporciona muita insegurança na economia e a todo o meio produtivo.

XVIII – os créditos são determinados em termos de energia elétrica ativa, não estando sua quantidade sujeita a alterações nas tarifas de energia elétrica;

(Art. 7, parágrafo XVIII, ANEEL nº 687/2015).

Por fim, a legislação indica a cobrança obrigatória mínima do custo de disponibilidade, para os produtores qualificados que pertencem ao Grupo B (baixa tensão), ou a demanda contratada; para os produtores que são faturados através

das regras do Grupo A (alta tensão). Nos três cenários propostos no estudo de caso dessa dissertação, o custo relacionado a demanda contratada pelo supermercado foi considerado.

I - deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A;

(Art. 7, parágrafo I, ANEEL nº 687/2015).

5. TECNOLOGIA DA COGERAÇÃO

Os sistemas de cogeração surgiram na Europa e EUA por volta de 1880, quando boa parte da indústria passou a utilizar o vapor proveniente das caldeiras tanto em processos industriais quanto para alimentar turbinas geradoras de eletricidade; o que proporcionou uma considerável redução no custo da energia (Díaz, Benito e Parise, 2010).

Após esse período inicial, com a construção de redes elétricas confiáveis e uma redução no custo da eletricidade comercializada no mercado, os sistemas de cogeração caíram em desuso, mas logo retornaram ao centro das atenções com a crise dos combustíveis em 1973 (Díaz, Benito e Parise, 2010).

Hoje, regiões como os EUA, Europa, Japão e Sudeste da Ásia proporcionam incentivos para cogeração em todo o setor primário industrial, pois a enxergam como um dos melhores métodos para geração de energia eficiente e com uma reduzida emissão de poluentes (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

Uma das definições contemporâneas da cogeração de energia consiste na produção e utilização combinada de energia elétrica e térmica, sendo esta última utilizada para refrigeração ou aquecimento de processos ou empreendimentos (Ortiga, Bruno e Coronas, 2013). Nesta produção sequencial de energia, ambas as cargas térmica e elétrica são produzidas a partir de uma única fonte de energia, o que proporciona um uso termodinamicamente eficiente do combustível (Huicochea et al., 2011).

5.1. FLUXO DA ENERGIA

As duas principais tecnologias envolvendo os sistemas de cogeração de energia que foram estudadas nessa dissertação são os motores alternativos de combustão interna e os *chillers* por absorção. O conceito geral do fluxo da energia do sistema de cogeração apresentado neste trabalho é apresentado conforme Figura 7.

Motores alternativos são os equipamentos responsáveis pela geração da eletricidade e podem funcionar através de diversos combustíveis, tal como o gás natural e diesel. Nestes equipamentos, o combustível e o ar são misturados e queimados com o objetivo de acionar um motor primário que por sua vez aciona um gerador de eletricidade, que será utilizada no empreendimento (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

Por mais eficiente que seja o equipamento, a maior parte da energia contida no combustível utilizado para seu funcionamento é convertida em calor e, normalmente, perdida para o meio ambiente (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017). Trata-se de uma limitação termo-física que independe do tipo de motorização ou do tipo de combustível, mesmo considerando o uso do gás natural, que é menos poluente.

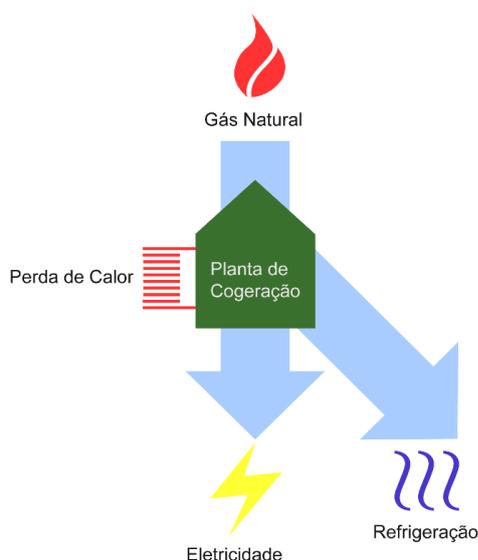


Figura 7 – Fluxo energético padrão do sistema de cogeração apresentado neste trabalho

Fonte: Autor (2019)

O aproveitamento dessa energia que seria desperdiçada se deve através de uma outra tecnologia chamada *chiller* por absorção. Este equipamento funciona acoplado ao motor a combustão para absorver a energia contida nos gases da exaustão, mas também pode funcionar absorvendo a energia contida no vapor ou água quente proveniente de algum processo industrial ou circuito desenhado para a cogeração (Guido et al., 2018).

O *chiller* trabalha com um ciclo de refrigeração termoquímico, a baixa pressão, em um sistema de circulação complexo envolvendo fluido refrigerante e absorvedor. Os *chillers* por absorção apresentados nos modelos dessa dissertação utilizam a água deionizada como líquido refrigerante e o brometo de lítio (LiBr) como absorvedor.

No ciclo do *chiller*, uma vez que o LiBr absorveu os vapores do líquido refrigerante, ele se transforma em uma solução diluída, que é enviada para uma seção do equipamento chamada de gerador; onde é aquecido com o objetivo de liberar esse vapor absorvido. Desse modo, o LiBr volta a ter a capacidade de absorção e o vapor, já no condensador do *chiller*, será liquefeito com a ajuda da água proveniente das torres de resfriamento do sistema, a temperaturas menores suficientes para permitir a condensação, e assim retornar ao início do ciclo (World Energy, 2015).

O efeito refrigerante, supondo que essa seja a necessidade do empreendimento, acontece quando o líquido refrigerante se evapora a baixa pressão, ao absorver calor da água do circuito que passará a funcionar com água resfriada (Bruno, Miguel e Castells, 1999; World Energy, 2015).

Desse modo, o *chiller* por absorção possui capacidade de resfriar água, o que é muito interessante para as mais diversas indústrias que precisam de energia elétrica e térmica ao mesmo tempo, como por exemplo as indústrias químicas, petroquímicas e de alimentos (Bassols et al., 2002).

5.2. CLASSIFICAÇÃO

Sistemas de cogeração de energia podem ser diferenciados de acordo com uma série de fatores, sendo uma das principais a sequência do uso da energia. Seguindo esse princípio, a classificação mais disseminada entre os pesquisadores são: *Topping Cycle*, *Bottoming Cycle* e *Combined Cycle* (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

Outra discretização é com relação ao tamanho do sistema a ser projetado, que normalmente é diferenciado através da legislação vigente no país de operação (Isa, Tan e Yatim, 2017). No caso do Brasil, desde que enquadrados no programa de geração qualificada, eles são classificados como *Micro* ou *Minigeração* (ANEEL, 2012).

5.2.1. SEQUÊNCIA DO USO DA ENERGIA

O esquema de operação adotado para implantação do sistema de cogeração influencia na sequência da energia que será utilizada para seu funcionamento. A maioria dos sistemas de cogeração são operados no esquema *Topping Cycle*. Neste modelo, o combustível é primeiramente utilizado para produzir eletricidade ao empreendimento, e uma porção da energia perdida na combustão em forma de calor é utilizada para produção de energia térmica útil.

A maioria das plantas que utilizam o modelo *Topping Cycle* tem como foco principal produzir eletricidade, vender o excedente para a concessionária de energia local e, de forma secundária, atender a demanda térmica de um empreendimento, fornecendo refrigeração ou aquecimento (Ebrahimi e Keshavarz, 2012; Isa, Tan e Yatim, 2017).

Os sistemas de cogeração do tipo *Bottoming Cycle* produzem em primeiro momento a energia térmica útil, através da queima de um combustível ou de alguma reação química. Após essa primeira etapa, uma porção desse calor gerado

é aproveitado para geração de energia elétrica (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Ebrahimi e Keshavarz, 2012).

Por fim, os esquemas *Combined Cycle* é a junção dos sistemas *Topping Cycle* e *Bottoming Cycle*; que normalmente são utilizados em grandes indústrias, tal como petroquímica e química, que precisam de constante aumento na eficiência em seus processos (Isa, Tan e Yatim, 2017).

Todos os modelos apresentados nessa dissertação foram desenhados de acordo com o esquema *Topping Cycle*.

5.3. RISCOS POTENCIAIS PARA IMPLANTAÇÃO

A implantação de sistemas de cogeração de energia implica na mitigação de uma série de riscos que comprometem a longevidade dos modelos ou até mesmo a viabilidade operacional e econômica dos empreendimentos que irão utilizar estes sistemas. Dentre os riscos principais, Isa, Tan e Yatim (2017) destacaram os relacionados à construção, operação, suprimento do combustível, viabilidade econômica e os riscos governamentais.

Na categoria de risco na construção, os problemas podem ocorrer em relação ao tempo de implantação, custo dos materiais para obra, possível problema com o espaço físico no local da implantação, tecnologia dos equipamentos comercializados, entre outros. Engenheiros certificados ou com experiência na implantação desse tipo de projeto podem mitigar esses riscos e torna-los irrelevantes (Isa, Tan e Yatim, 2017).

Os riscos de operação caminham juntos com os riscos relacionados ao suprimento do combustível. Antes da implantação do projeto de cogeração, o gestor deve verificar se o empreendimento terá um corpo técnico para operar o modelo ou se precisará de suporte técnico para eventual problema na operação (Isa, Tan e Yatim, 2017). Ao mesmo tempo, no local da implantação, deve haver fornecimento constante e sem interrupções do gás natural pela concessionária (combustível utilizado nos modelos dessa dissertação).

Por fim, o modelo de cogeração implantado deve ter a capacidade de fornecer a carga de energia elétrica e térmica demandada pelo empreendimento a um preço competitivo, capaz de substituir a longo prazo a utilização da eletricidade fornecida pela concessionária de energia. Outro ponto importante está relacionado aos riscos políticos, que estão direcionados aos incentivos para implantação de sistemas de cogeração, tributação da energia produzida e controles ambientais. Neste caso, o investidor deve considerar estas variáveis para que, durante a vida útil do sistema, não haja impedimentos capazes de inviabilizar o projeto (Isa, Tan e Yatim, 2017).

CAPÍTULO 3

6. METODOLOGIA DE ANÁLISE PARA APLICAÇÃO GERAL

As simulações para implantação de sistemas de cogeração no mercado brasileiro foram realizadas com a aplicação de um indicador técnico, que trabalha a compatibilidade entre o motor alternativo e o *chiller* por absorção, um indicador econômico, para analisar a viabilidade de operação diária dos modelos; além de um indicador ambiental, onde a emissão do dióxido de carbono dos sistemas é apresentada em kgCO₂/h.

As tecnologias apresentadas nessa dissertação envolvem motores alternativos de combustão interna operados a gás natural, comercializados no mercado brasileiro, e com potência variando de 40 kW a 432 kW. Os *chillers* por absorção apresentam capacidade de refrigeração de 30 a 87 TR, operados a água quente, vapor ou gás exausto e são comercializados mundialmente.

6.1. MODELO DE SISTEMA DE COGERAÇÃO

O fluxo de energia considerado nos modelos de sistemas de cogeração foi o mesmo apresentado na Figura 7, ou seja, projetados de acordo com o esquema *Topping Cycle*. Os modelos contam com todos os componentes essenciais de uma planta funcional, como por exemplo as torres de resfriamento, motor alternativo de combustão interna, *chiller* por absorção, válvulas de segurança e bombas centrífugas.

Os sistemas que funcionam com *chiller* operado a água quente ou vapor foram considerados com a conexão baseada em um trocador de calor intermediário, seguindo a orientação de Cecchinato, Corradi e Minetto (2010); que recomendam o uso do trocador para aproveitamento do calor proveniente dos gases exaustos. A planta utilizada nesses modelos é apresentada na Figura 11, da sessão do estudo de caso.

Para os modelos com *chiller* operado a gás exausto, o projeto envolveu uma conexão direta entre o motor alternativo de combustão interna e o *chiller* por absorção. A planta completa, incluindo o detalhamento das correntes de energia térmica, elétrica, de refrigeração do motor e *chiller*, entre outros, é apresentada conforme Figura 8.

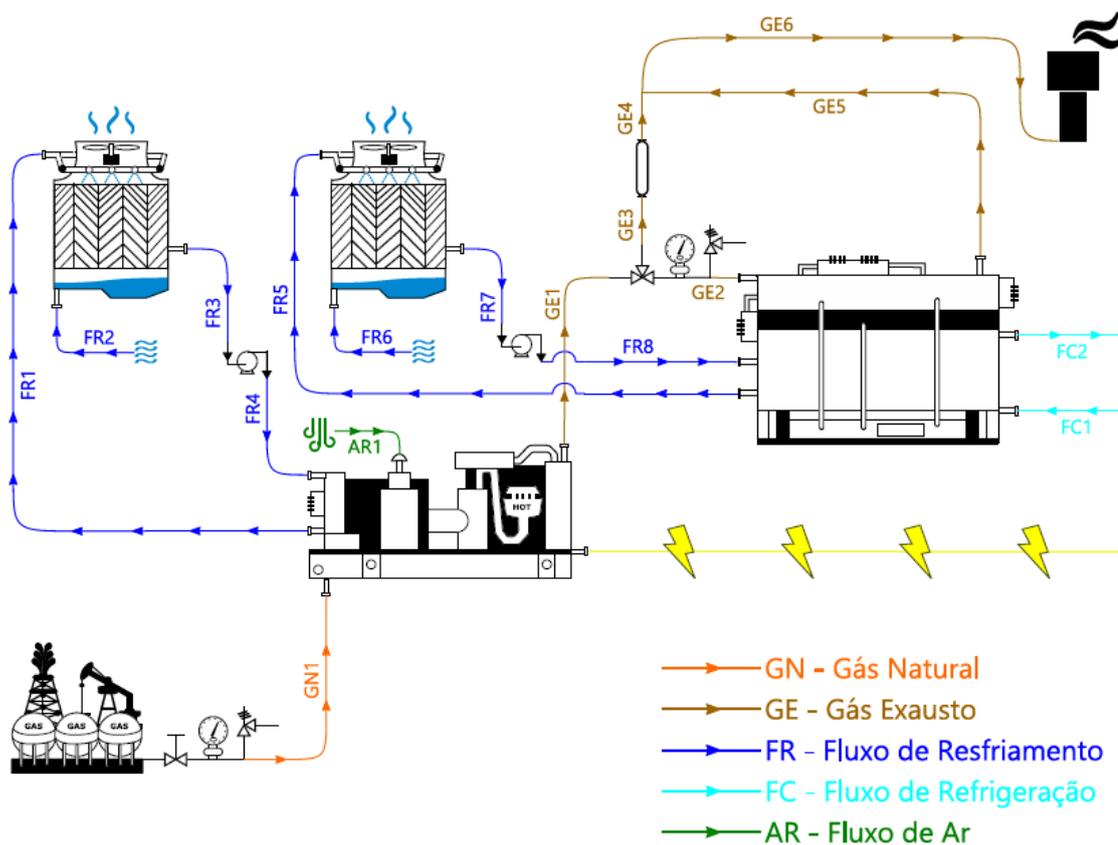


Figura 8 – Modelo do sistema de cogeração de energia com conexão direta entre o motor alternativo e o *chiller* por absorção.

Fonte: Autor (2019)

6.2. INDICADOR TÉCNICO

6.2.1. ADEQUAÇÃO TERMODINÂMICA (AT)

Para analisar a compatibilidade termodinâmica (oferta e demanda por energia térmica ou calor) entre os motores alternativos de combustão interna a gás natural e os *chillers* por absorção que foram selecionados para utilização nos modelos, um

indicador técnico foi desenvolvido. Chamado de 'AT', o indicador de adequação termodinâmica é representado conforme Equação (3).

$$AT = \frac{PE}{CR} = \frac{\dot{E}_{Comb} \cdot \eta_{MCI}}{(\dot{m}_{Ge} \cdot C_{pGe} (T_{Ge} - T_{Ref})) \cdot COP} \quad (3)$$

Onde:

AT = Adequação termodinâmica

PE = Potência elétrica

CR = Capacidade de refrigeração

$\dot{E}_{Comb.}$ = Fluxo de energia proveniente do combustível

η_{MCI} = Rendimento do motor alternativo de combustão interna

\dot{m}_{Ge} = Vazão mássica do gás exausto

C_{pGe} = Calor específico do gás exausto

T_{Ge} = Temperatura do gás exausto

$T_{REF.}$ = Temperatura de referência

COP = Coeficiente de performance

Este indicador mostra a relação entre a potência elétrica (PE) do conjunto motor gerador e a capacidade de refrigeração (CR) do *chiller* por absorção. Foi considerado a temperatura de referência ($T_{Ref.}$) em 120°C (World Energy, 2015) e o calor específico do gás exausto (C_{pGe}) em $1,10 \frac{kJ}{kg.K}$ (Çengel e Boles, 2013).

As temperaturas dos gases exaustos (T_{Ge}) de cada modelo foram baseadas nos catálogos dos equipamentos do fabricante CHP Brasil. Como hipótese conservadora, foi considerado também que a energia removida pelo sistema de arrefecimento não será utilizada pois não é adequada para operação dos *chillers* por absorção.

O fluxo de energia proveniente do combustível ($\dot{E}_{Comb.}$) foi encontrada através da multiplicação da vazão mássica do combustível com o poder calorífico inferior (PCI) do gás natural. Foi utilizado o PCI de $47 \frac{MJ}{kg}$ ($34,97 \frac{MJ}{m^3}$), a 20°C de temperatura

e pressão de 1 atm ($8.358 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ - CHP Brasil) e alguns resultados encontrados para a potência elétrica (PE) foram aproximados.

Os rendimentos dos motores alternativos dos modelos foram calculados conforme Equação (4), seguindo a 1ª Lei da Termodinâmica (Çengel e Boles, 2013). A potência gerada pelo motor (P_g) e vazão mássica do gás natural (\dot{C}_{Gn}) foram consideradas de acordo com o catálogo do fabricante CHP Brasil. O valor do poder calorífico inferior (PCI) seguiu o mesmo critério apresentado no parágrafo anterior. Os resultados encontrados foram comparados com os apresentados pelo catálogo do fabricante CHP Brasil.

$$\eta_{MCI} = \frac{P_g}{\dot{C}_{Gn} \cdot PCI} \quad (4)$$

Onde:

η_{MCI} = Rendimento dos motores alternativos de combustão interna

P_g = Potência gerada pelo motor

\dot{C}_{Gn} = Vazão mássica do gás natural

PCI = Poder calorífico inferior

O consumo de energia elétrica das torres de resfriamento e bombas foi desprezado. Os Coeficientes de Performance (COP) utilizados nesta análise para os *chillers* por absorção que utilizam vapor, água quente e gases exaustos, foram 0,83, 0,81 e 1,36, respectivamente (World Energy, 2015).

Foi considerada a indicação de Colonna e Gabrielli (2003), que a modelagem de sistemas de cogeração com um alto valor do COP nos *chillers* por absorção (neste caso, os operados a gases exaustos), implica em maior capacidade de refrigeração.

A vazão mássica proveniente dos gases da exaustão do motor alternativo (\dot{m}_{Ge}) foi encontrada através da Equação (5) de Clapeyron (Çengel e Boles, 2013). Foi considerado a pressão do gás exausto (P_{Ge}) a 101 kPa, massa molecular do ar

(MM_{Ar}) de $29 \frac{\text{kg}}{\text{k.mol}}$, a constante universal dos gases (R_{Ge}) a $8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ e a vazão volumétrica do gás exausto (\dot{V}_{Ge}) de acordo com o catálogo do fabricante CHP Brasil.

$$P_{Ge} \cdot \dot{V}_{Ge} = \frac{\dot{m}_{Ge}}{MM_{Ar}} \cdot R_{Ge} \cdot T_{Ge} \quad (5)$$

Onde:

P_{Ge} = Pressão do gás exausto

\dot{V}_{Ge} = Vazão volumétrica do gás exausto

\dot{m}_{Ge} = Vazão mássica do gás exausto

MM_{Ar} = Massa molecular do ar

R_{Ge} = Constante universal dos gases

T_{Ge} = Temperatura do gás exausto

Em todos os modelos simulados, o balanço entre a potência (calor) proveniente dos gases exaustos (E_{Ge}) e calor necessário para alimentar o *chiller* (E_{Ch}) foi realizado. Para o cálculo do balanço de energia nos modelos com *chillers* operados a água quente, foi utilizado as Equações (6) e (7) de transferência de calor, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica (Kroos e Potter, 2016).

A temperatura da água necessária para funcionamento do *chiller* ($T_{Água}$) e a vazão mássica da água ($\dot{m}_{Água}$) foi utilizada de acordo com o catálogo do fabricante (World Energy, 2015). O calor específico da água ($Cp_{Água}$) utilizado foi de $4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ (Çengel e Boles, 2013).

$$E_{Ge} = \dot{m}_{Ge} \cdot Cp_{Ge} \cdot (T_{Ge} - T_{Ref.}) \quad (6)$$

Onde:

E_{Ge} = Calor proveniente do gás exausto

\dot{m}_{Ge} = Vazão mássica do gás exausto

Cp_{Ge} = Calor específico do gás exausto

T_{Ge} = Temperatura do gás exausto

$T_{REF.}$ = Temperatura de referência

$$E_{Ch} = \dot{m}_{\text{Água}} \cdot C_{p\text{Água}} \cdot (T_{\text{Água}(1)} - T_{\text{Água}(2)}) \quad (7)$$

Onde:

E_{Ch} = Calor necessário para alimentar o *chiller*

$\dot{m}_{\text{Água}}$ = Vazão mássica da água

$C_{p\text{Água}}$ = Calor específico da água

$T_{\text{Água}(1)}$ = Temperatura da água

$T_{\text{Água}(2)}$ = Temperatura da água

Para os modelos que utilizam *chiller* por absorção operado a vapor, também foi utilizada a Equação (8) de transferência de calor; porém utilizando as entalpias ($h_{vp(1)}$ e $h_{vp(2)}$) como variáveis. Os valores da pressão (P_{vp}), temperatura (T_{vp}) e vazão mássica do vapor (m_{vp}) foram considerados de acordo com o catálogo do fabricante (World Energy, 2015).

$$E_{Ch} = \dot{m}_{vp} \cdot (h_{vp(1)} - h_{vp(2)}) \quad (8)$$

Onde:

E_{Ch} = Calor necessário para alimentar o *chiller*

\dot{m}_{vp} = Vazão mássica do vapor

$h_{vp(1)}$ = Entalpia do vapor de entrada

$h_{vp(2)}$ = Entalpia do vapor de saída

Com relação aos modelos que utilizam *chiller* por absorção operado a gás exausto, a equação de transferência de calor foi feita de forma direta; partindo da premissa que a troca de calor foi realizada em regime permanente, a pressão constante e com o gás exausto ideal.

6.3. INDICADOR AMBIENTAL

6.3.1. GRAU DE EMISSÃO DE CO₂

Em 2007, os sistemas de cogeração de energia evitaram que 14,76 milhões de toneladas de CO₂ fossem enviados para a atmosfera. Isso equivale a 2,71 milhões de toneladas para cada 1 GW de capacidade instalada (Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017; Carbon Trust, 2010).

Nessa dissertação, foi realizada uma comparação entre a emissão de dióxido de carbono (CO₂) dos modelos de cogeração de energia apresentados com a emissão dos mesmos projetos, supondo a utilização da eletricidade comercializada pela concessionária.

As simulações para obtenção do grau de emissão de dióxido de carbono (CO₂) dos modelos de cogeração foram realizadas para cada nível de potência apresentada, porém só foi considerado para cálculo os sistemas que se apresentaram funcionais pelo indicador de adequação termodinâmica (AT).

Os resultados da emissão de CO₂ desses modelos (com o sistema de cogeração em funcionamento) foram encontrados utilizando a Equação (9), que consiste da multiplicação do consumo de combustível (C_{Gn}) na unidade $\frac{m^3}{h}$, conforme catálogo do fabricante do motor alternativo; com o PCI do gás natural ($8.358 \frac{kcal}{m^3}$ ou $34,97 \frac{MJ}{m^3}$, a 20° C de temperatura e pressão de 1 atm) e com o fator de correção (F_c) $0,000235 \text{ em } \frac{kgCO_2}{kcal}$.

$$\text{Emissão}_{CO_2} = C_{Gn} \cdot PCI \cdot F_c \quad (9)$$

Onde:

Emissão CO₂ = Quantidade de dióxido de carbono emitida

C_{Gn} = Consumo do gás natural

PCI = Poder calorífico inferior

F_c = Fator de correção

Esse fator de correção é derivado do indicador apresentado no *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006), que considera que o gás natural emite $56,1 \frac{\text{gCO}_2}{\text{MJ}}$. A porção da energia térmica (água gelada) produzida pelo *chiller* por absorção foi considerada como isenta de emissão de CO₂.

Para cálculo da emissão de dióxido de carbono (CO₂), supondo que os modelos de cogeração adquirem eletricidade da concessionária de energia, foi considerado um supermercado refrigerando seus alimentos com sistemas de compressão com coeficiente de performance (COP) igual a 3 (Eletrofrio, 2018).

Os resultados foram associados com a matriz energética brasileira nos anos de 2014, 2015 e 2017, que emitiram $131,62 \frac{\text{tCO}_2}{\text{GWh}}$, $120,91 \frac{\text{tCO}_2}{\text{GWh}}$ e $93,39 \frac{\text{tCO}_2}{\text{GWh}}$, respectivamente; segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG, 2018).

6.4. INDICADOR ECONÔMICO

6.4.1. SPARK SPREAD (SS)

Uma forma comum para estimar a rentabilidade pontual (no dia) da geração de eletricidade, através de motores alternativos de combustão interna a gás natural, é a utilização do indicador *Spark Spread* (SS). Este indicador tem como objetivo principal analisar a estabilidade financeira diária da planta de geração e indicar se o empreendimento deve produzir mais ou menos eletricidade (EIA, 2018).

A forma de cálculo do *Spark Spread* (SS) é apresentada conforme Equação (10), que envolve a diferença entre o preço da eletricidade comercializada pela concessionária de energia (P_{Ee} em $\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$) com o preço da energia do gás natural (P_{Gn} em $\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$). A eficiência do motor alternativo (η_{MCI}) também é considerada e segue a 1ª Lei da Termodinâmica.

$$\text{Spark Spread} = P_{Ee} - \frac{P_{Gn}}{\eta_{MCI}} \quad (10)$$

Onde:

P_{Ee} = Preço da eletricidade

P_{Gn} = Preço da energia do gás

η_{MCI} = Rendimento dos motores alternativos de combustão interna

O preço da eletricidade (P_{Ee}) praticado no dia é facilmente encontrado através da concessionária de energia. O preço da energia do gás (p_{Gn}) deve ser calculado envolvendo o valores do gás natural praticado no mercado ($\frac{R\$}{m^3}$), o consumo desse combustível ($\frac{m^3}{h}$) pelo motor alternativo e o poder calorífico inferior (PCI); que foi considerado em $34,97 \frac{MJ}{m^3}$, a 20°C de temperatura e pressão de 1 atm ($8.358 \frac{kcal}{m^3}$ - CHP Brasil).

Spark Spread (SS) positivo significa que a empresa está ganhando dinheiro em produzir eletricidade com o sistema, já com o SS negativo, o sistema de geração da eletricidade não é lucrativo; neste caso recomenda-se adquirir da concessionária.

O estudo detalhado do indicador *Spark Spread* (SS) não faz parte do escopo dessa dissertação, para mais informações Elias, Wahab e Fang (2016), Martínez e Torró (2018) e EIA (2018).

6.4.2. VIABILIDADE ECONÔMICA OPERACIONAL (VEO)

Como se pode observar, o *Spark Spread* (SS) não considera o montante economizado ($\frac{R\$}{kWh}$) com a geração de energia térmica, ou seja, não analisa o uso da energia térmica residual. Desse modo, o indicador SS não é recomendado para aplicação em sistemas de cogeração de energia.

Partindo dessa premissa, para uma análise econômica da operação diária dos sistemas de cogeração utilizando motor alternativo e *chiller* por absorção, uma adaptação do SS foi realizada.

Chamado de VEO (Viabilidade Econômica Operacional), o novo indicador considera a contribuição da geração de energia térmica pelo *chiller* ($\frac{R\$}{kWh}$), levando em conta o aproveitamento do gás exausto do motor alternativo, que foi direcionado para o equipamento de absorção. O custo do consumo da eletricidade com o funcionamento do motor alternativo e com o *chiller* por absorção foi desprezado.

Para encontrar a contribuição da geração de energia térmica pelo *chiller* ($\frac{R\$}{kWh}$), deve-se calcular a relação entre a eletricidade requerida e a capacidade de refrigeração do *chiller* por absorção. Energia (contribuição) esta, que seria desperdiçada na atmosfera através dos gases exaustos, caso não houvesse o equipamento de absorção.

De modo geral, o aproveitamento da energia proveniente da queima do combustível, nos motores alternativos em sistemas de cogeração, segue o fluxo teórico apresentado conforme Figura 9. O que determina, primeiramente, as variações nas porcentagens (%) é a eficiência do motor, seguido pela energia removida pelo sistema de arrefecimento e pelos gases da exaustão (Kroos e Potter, 2016).

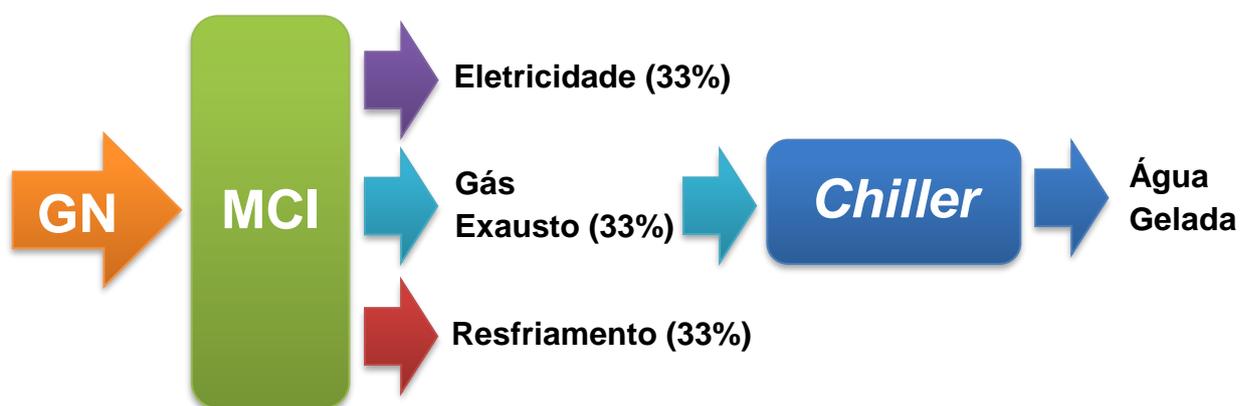


Figura 9 – Fluxo teórico de energia (%) de sistemas de cogeração

Fonte: Autor (2019)

O valor da relação eletricidade refrigeração (RER) é encontrado através da Equação (11). A eficiência do motor alternativo segue a 1ª Lei da Termodinâmica e o coeficiente de performance do *chiller* por absorção (COP_{CA}) foi utilizado de acordo

com o catálogo do fabricante (World Energy, 2015). Foi considerado como premissa, que a porção de energia residual (ver Figura 9) direcionada para o *chiller* por absorção (%) é a mesma que a diluída pelo sistema de arrefecimento do motor (%). O termo 'y' representa a porcentagem (%) da energia do gás exausto aproveitada pelo *chiller* por absorção. Com o gás exausto sendo resfriado até 120 °C, o valor considerado de 'y' foi de 85%.

Assim, a relação eletricidade refrigeração (RER) representa a energia elétrica necessária para prover o mesmo efeito refrigeração proporcionado pelo *chiller* por absorção ao utilizar os gases exaustos do motor. Foi considerado também, um supermercado refrigerando seus alimentos com sistemas de compressão com coeficiente de performance (COP_{CC}) igual a 3 (Eletrofrio, 2018), para efeito de comparação com o sistema de cogeração em análise.

$$RER = \left(\frac{1 - \eta_{MCI}}{2} \right) \cdot y \cdot \frac{COP_{CA}}{COP_{CC}} \quad (11)$$

Onde:

RER = Relação eletricidade refrigeração

η_{MCI} = Rendimento do motor alternativo de combustão interna

COP_{CA} = Coeficiente de performance do *chiller* por absorção

COP_{CC} = Coeficiente de performance do *chiller* por compressão

y = Porcentagem de gás exausto aproveitado

Desse modo, para analisar a viabilidade econômica operacional diária de sistemas de cogeração, a fórmula clássica do *Spark Spread* (SS) foi adaptada; conforme Equação (12). A contribuição do *chiller* com a porção de energia ($\frac{R\$}{kWh}$) que seria rejeitada, passou a ser considerada.

$$SS_{Adaptado} = P_{Ee} + \left(\frac{1 - \eta_{MCI}}{2} \cdot y \cdot \frac{COP_{CA}}{COP_{CC}} \right) \cdot P_{Ee} - \frac{P_{Gn}}{\eta_{MCI}} \quad (12)$$

Onde:

SS_{Adaptado} = *Spark Spread* adaptado

P_{Ee} = Preço da eletricidade

P_{Gn} = Preço da energia do gás

η_{MCI} = Rendimento do motor alternativo de combustão interna

COP_{CA} = Coeficiente de performance do *chiller* por absorção
 COP_{CC} = Coeficiente de performance do *chiller* por compressão
 y = Porcentagem de gás exausto aproveitado

Por fim, a fórmula final do VEO é apresentada conforme Equação (13).

$$VEO = P_{Ee} \cdot (1 + RER) - \frac{P_{Gn}}{\eta_{MCI}} \quad (13)$$

Onde:

VEO = Viabilidade Econômica Operacional

P_{Ee} = Preço da eletricidade

RER = Relação eletricidade refrigeração

η_{MCI} = Rendimento do motor alternativo de combustão interna

P_{Gn} = Preço da energia do gás

O VEO é um indicador que tem como foco atender a gestão diária da geração da energia elétrica e térmica, em função da flutuação dos preços do gás natural e da eletricidade. Desse modo, o empreendimento ou indústria pode tomar uma decisão rápida se deve produzir mais ou menos eletricidade, ou até mesmo suspender o funcionamento do sistema de cogeração e passar a adquirir eletricidade da concessionária.

O VEO não é recomendado para utilização em uma análise de investimento de aquisição ou início de negócio, pois não considera custos de manutenção, compra de equipamentos, fluxo de caixa, taxas de retorno, juros, etc. Na sessão do estudo de caso dessa dissertação, mostraremos uma análise de investimentos detalhada para um sistema de cogeração a ser implantado em um supermercado.

6.5. CORRENTES DE FLUXO DOS MODELOS

Para cada corrente apresentada na Figura 8 e na Figura 11 foi calculado e/ou pesquisado os principais indicadores de trabalho, como temperatura (°C), pressão (kPa) e a vazão mássica ($\frac{kg}{s}$). Alguns indicadores foram encontrados através do catálogo dos fabricantes dos equipamentos; outros foram calculados através de um

balanço de energia, utilizando as Equações (6) e (7), ou aplicando a Equação de Clapeyron (5).

Para cálculo da pressão de trabalho (P) nas correntes de resfriamento FR1 e FR5, foi utilizada a Equação (14). O valor considerado para a densidade da água (ρ) foi de $1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ e para a gravidade (g), $10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Também foi considerada a instalação das torres de resfriamento com 2 metros (h) de altura (Kroos e Potter, 2016). Os resultados encontrados estão de acordo com a pressão de trabalho informada pelo fabricante da torre de resfriamento (Korper, 2018).

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (14)$$

Onde:

P = Pressão

ρ = Densidade da Água

g = Gravidade

h = Altura

Para cálculo da água de reposição, FR2 para o motor alternativo e FR6 para o *chiller* por absorção (ver Figura 8 e Figura 11), proveniente das perdas por evaporação, arraste e purga, foi considerada a técnica do Inc. Betz Laboratories (1991); que utiliza para os cálculos a Equação (15).

$$\text{Purga (\%)} = \frac{\text{Perda de água por evaporação (\%)}}{\text{Ciclos de conc. permitidos} - 1} - \text{Perda por arraste (\%)} \quad (15)$$

As porcentagens de perda por evaporação, arraste e os ciclos de concentração são predeterminados e seguem o esquema apresentado na Figura 10. Como o estudo de caso dessa dissertação se trata de um supermercado localizado no litoral de Salvador - BA, foi considerado o ciclo de concentração igual a 4, ou seja, indicado para regiões onde há muita corrosão nas tubulações (Inc. Betz Laboratories, 1991).

Desse modo, a água total de reposição foi considerada como 5% da vazão da água de resfriamento (1,2% para arraste, 3,75% para evaporação e 0,05% para purga).

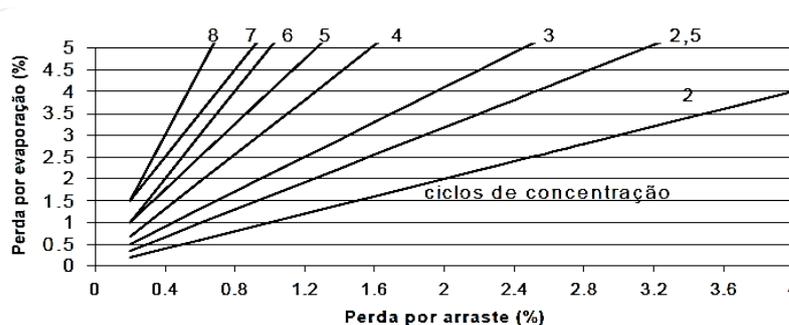


Figura 10 – Relação entre perda por evaporação, perda por arraste e ciclos de concentração.

Fonte: Betz Handbook of Industrial Water Conditioning (1991)

6.6. EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS

A eficiência total dos modelos de cogeração foi calculada conforme Equação (16), seguindo a 1ª Lei da Termodinâmica (Çengel e Boles, 2013). A potência gerada pelo motor (P_g) foi considerada de acordo com o catálogo do fabricante CHP Brasil.

A capacidade de refrigeração ($C_{\text{Refrig.}}$) foi calculada a partir do COP fornecido pela empresa fabricante e os resultados foram comparados com os apresentados no catálogo do equipamento. Os dados da vazão mássica de gás natural (C_{Gn}) e o poder calorífico inferior (PCI), seguiram os mesmos critérios apresentados para utilização na Equação (4).

$$\eta_{\text{MODELO}} = \frac{P_g + C_{\text{Refrig}}}{C_{Gn} \cdot \text{PCI}} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde:

η_{MODELO} = Rendimento do modelo de Cogeração

P_g = Potência gerada pelo motor

C_{Refrig} = Capacidade de refrigeração

C_{Gn} = Vazão mássica do gás natural

PCI = Poder Calorífico Inferior

6.7. INDICADORES DE INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO

Na sessão do estudo de caso dessa dissertação, foram indicados três cenários de risco para implantação de um sistema de cogeração de energia com foco em um supermercado. Para quantificar a possibilidade de investimento, foram utilizados os principais indicadores praticados para esse tipo de análise, como por exemplo o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o 'payback' descontado (ABREU FILHO, 2007).

Com o objetivo de se encontrar resultados o mais próximo possível da realidade do investimento, avaliou-se os custos atrelados a aquisição dos equipamentos, obra civil no empreendimento, despesas com o combustível de operação (gás natural), manutenção, operação e depreciação dos equipamentos; bem como os benefícios obtidos com a implementação do modelo, seja no âmbito financeiro, seja no quesito dos incentivos governamentais.

Os custos com manutenção e operação dos equipamentos foram calculados seguindo a metodologia do livro '*Thermal Design and Optimization*' do Bejan, Tsatsaronis e Moran (2016). A depreciação dos equipamentos foi calculada de acordo com as diretrizes tratadas na Resolução 674 da ANEEL (2015), que fala do controle patrimonial de equipamentos do setor elétrico brasileiro.

O critério do Valor Presente Líquido (VPL) é um dos mais utilizados em análise de investimentos. Apesar de medir o lucro em termos absolutos, o VPL não deve ser aplicado de forma isolada, já que diferentes critérios (indicadores) medem diferentes aspectos de um projeto (ABREU FILHO, 2007).

Nessa dissertação, o Valor Presente Líquido dos modelos foi encontrado utilizando a função VPL do *Microsoft Excel*, que é regida pela Equação (17):

$$VPL = FC_0 + \frac{FC_1}{(1+TMA)^1} + \frac{FC_2}{(1+TMA)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} \quad (17)$$

Onde:

VPL = Valor Presente Líquido

FC₀ = Fluxo de caixa no período zero, ou seja, o investimento

FC_n = Fluxo de caixa em determinado período (meses ou anos)

TMA = Taxa mínima de atratividade ou taxa de desconto

O critério da Taxa Interna de Retorno (TIR), apesar de controverso, ainda é muito utilizado por profissionais de finanças (ABREU FILHO, 2007). O TIR mede a taxa de retorno do investimento a ser implantado através da análise conjunta com o Valor Presente Líquido (VPL). Em outras palavras, é a taxa pela qual o VPL de um projeto é zero (ABREU FILHO, 2007).

Para evitar problemas de implementação da Taxa Interna de Retorno (TIR), os fluxos de caixa simulados, nos cenários de investimento, apresentaram apenas uma mudança de sinal, ou seja, o investimento de implantação negativo e o fluxo anual de receitas positivo (ABREU FILHO, 2007).

As Taxas Internas de Retorno dos modelos foram encontradas utilizando a função TIR do *Microsoft Excel*, que é regida pela Equação (18):

$$0 = FC_0 + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (18)$$

Onde:

FC_0 = Fluxo de caixa no período zero, ou seja, o investimento

FC_n = Fluxo de caixa em determinado período (meses ou anos)

i = Taxa Interna de Retorno

Por fim, o 'payback' descontado mostra o tempo de retorno do investimento, considerando o valor do dinheiro no tempo. O indicador 'payback' descontado é alcançado através do desconto do valor presente do fluxo de caixa dos projetos em análise (ABREU FILHO, 2007). Nos cenários de risco, da sessão do estudo de caso, para dar mais precisão no valor do 'payback' descontado; foi utilizado a função ABS do *Microsoft Excel*.

CAPÍTULO 4

7. ESTUDO DE CASO

7.1.O SUPERMERCADO

O estudo de caso apresentado nessa dissertação, para implantação de um sistema de cogeração de energia, foi desenvolvido em um supermercado típico e em funcionamento, localizado no Brasil, na região metropolitana de Salvador – Bahia.

Com apenas um andar e uma área de vendas de aproximadamente 9.000 m², o empreendimento possui diversos equipamentos de ar condicionado, além dos racks de congelados (RBT – Racks de Baixa Temperatura) e dos racks de resfriados (RMT – Racks de Média Temperatura) instalados e em pleno funcionamento.

No subsolo, o supermercado possui pequenas lojas terceirizadas que comercializam produtos fora do escopo do empreendimento, além de um amplo estacionamento para todos os clientes. Para o estudo de implantação do sistema, a área dessas pequenas lojas foi considerada, junto com a área total onde o supermercado em questão comercializa seus produtos.

Tabela 2. Parâmetros característicos do supermercado em estudo

Parâmetros	
Área de vendas (m ²)	9.000
Horário de funcionamento	das 7:00 às 21:00h
Dias de funcionamento	7 dias por semana
Gerador a diesel (<i>prime mover</i>)	456 kVa / 365 kW
Demanda contratada junto à concessionária	280 kW (Grupo A)

Fonte: Autor

O empreendimento funciona 14 horas por dia, todos os dias da semana. Com o objetivo de diminuir o consumo com eletricidade no horário de ponta (18:00 às 21:00h), um gerador a diesel é acionado nesse período de tarifas mais elevadas. A

entrada de ar quente proveniente de área externa foi considerada irrelevante, em função da presença de portas automáticas nas entradas e saídas. A Tabela 2 mostra as características básicas do empreendimento.

A demanda contratada pelo supermercado junto a concessionária de energia é de 280 kW. O faturamento é baseado nas tarifas de clientes de alta tensão (Grupo A), com taxa média de 0,4557 R\$/kWh (com impostos). Levando em conta a contribuição do gerador a diesel nos horários de ponta do supermercado, em um mês típico de funcionamento, o gasto diário com energia elétrica é de aproximadamente R\$ 3.067,30; conforme Tabela 3.

Tabela 3. Fatura da energia elétrica em um mês de alto consumo, sem o sistema de cogeração

Energia (kWh)	Consumo Ponta (kWh)	Geração Ponta (kWh)	Consumo Fora de Ponta (kWh)	Custo de disponibilidade (R\$)	Valor total da Fatura (R\$)
152.850	32.850	32.850	120.000	3.690,57	92.018,97

Fonte: Autor

Em função da alta taxa de manutenção e do risco de insatisfação da clientela, caso o empreendimento passe algum momento sem funcionamento da refrigeração, o supermercado não possui ar condicionado central. Desse modo, funciona com 26 unidades de ar condicionado tipo '*Split*', que são distribuídos pelo empreendimento e operam com difusores que ajudam a refrigerar todo o ambiente de forma uniforme.

No quesito conservação e refrigeração dos alimentos, o supermercado possui racks que funcionam com um sistema de refrigeração por compressão, que são divididos em racks de média temperatura (para alimentos que precisam ser resfriados, mas não congelados) e racks de baixa temperatura (para alimentos que precisam ser conservados em temperaturas negativas).

Para manutenção, durabilidade e segurança na comercialização dos alimentos, ambos os racks funcionam 24 horas por dia, todos os dias da semana. Os condicionadores de ar do tipo '*Split*' refrigeram as áreas comuns, porém só funcionam 14 horas por dia, que é o horário de funcionamento do empreendimento.

A Tabela 4 mostra o detalhamento da carga térmica de refrigeração supermercado. O valor encontrado de 78.196 kWh (51% da energia por mês com refrigeração), está alinhado com o trabalho apresentado por Marimón et al (2011), que estudou sobre esse tipo de empreendimento, e atestou que eles, tipicamente, gastam uma média de 47% da energia com refrigeração.

A quantidade de energia total para atender o funcionamento dos computadores, iluminação e os RBT (racks de baixa temperatura), que não serão atendidos pelo *chiller* por absorção e continuarão funcionando com equipamento por compressão, chamamos de carga elétrica. O montante necessário, em energia por mês, para atender a esse quesito é de 83.206 kWh.

Tabela 4. Carga térmica de refrigeração do supermercado

Descrição	Quantidade	BTU/h	kWh/mês	kWh/mês Total
Ar Split	20	58.000	2.356	47.123
Ar Split	6	9.000	342	2.051
RBT	1	121.572	8.551	8.552
RMT	1	291.024	20.470	20.470
			Total no mês:	78.196

Fonte: Autor

7.2. MODELAGEM DA PLANTA DE COGERAÇÃO

Para atender a carga elétrica e térmica do supermercado, as principais tecnologias existentes no mercado foram pesquisadas. Os motores alternativos selecionados operam a gás natural e possuem potência de 130 kW (160 kVA) e 200 kW (250 kVA). Com 6 cilindros em linha, pistões e carcaça feitas em alumínio, o motor possui todo o sistema de gerenciamento de potência realizado de forma eletrônica (CHP Brasil, 2018).

Os principais modelos de *chiller* por absorção comercializados no mercado operam com amônia e água, sendo a amônia atuando como refrigerante e a água como absorvente; e com brometo de lítio e água, neste caso com a água atuando como refrigerante e o brometo de lítio como absorvente.

Com grandes seções de alimentos que devem ser congelados para comercialização, os *chillers* por absorção que operam com amônia são excelentes para supermercados, pois possuem capacidade de fornecer água (refrigerante secundário) a temperatura negativa (Arteconi, Brandoni e Polanara 2009 e Maidment et al., 1999).

A incapacidade de fornecer água a temperaturas negativas, devido a possível cristalização do brometo de lítio, é uma característica dos *chillers* que operam com esse absorvente (Marimón et al., 2011; Ochoa et al., 2014). Isso é um ponto negativo para utilização em supermercados, pois o mesmo não consegue atender os racks de baixa temperatura (RBT).

Para este estudo de caso, *chillers* por absorção que operam com amônia e com capacidade de refrigeração para atender a carga térmica do supermercado, não foram encontrados. Os equipamentos disponíveis possuem capacidade muito superior à demandada pelo supermercado, sendo esta demanda considerada pequena pelos principais fabricantes.

Em função disso, um *chiller* que opera com brometo de lítio e água foi selecionado. O equipamento escolhido utiliza água quente como fonte de alimentação térmica e possui demais características conforme Tabela 5. Sua principal função será fornecer carga térmica para o sistema de ar condicionado e para os racks de média temperatura (RMT) do empreendimento. Foi considerado que a temperatura necessária para conservação dos alimentos nos racks de média temperatura varia entre 10 a 20° C.

Tabela 5. Características técnicas principais do *chiller* por absorção em estudo

Características	
Capacidade de refrigeração	30 TR
COP (Coeficiente de Performance)	0,827
Temperatura da água para refrigeração	a partir de 5°
Temperatura de entrada da alimentação por água quente	95° C
Temperatura de entrada da alimentação por água quente	80° C
Fluido de operação	Brometo de Lítio / Água

Fonte: World Energy (2015)

Como o *chiller* por absorção selecionado utiliza água quente como fonte de energia para funcionamento, o modelo de cogeração apresentado na Figura 8, foi adaptado com a implementação de um trocador de calor para aproveitamento da energia proveniente dos gases da exaustão. A planta implementada para este estudo de caso é apresentada conforme Figura 11.

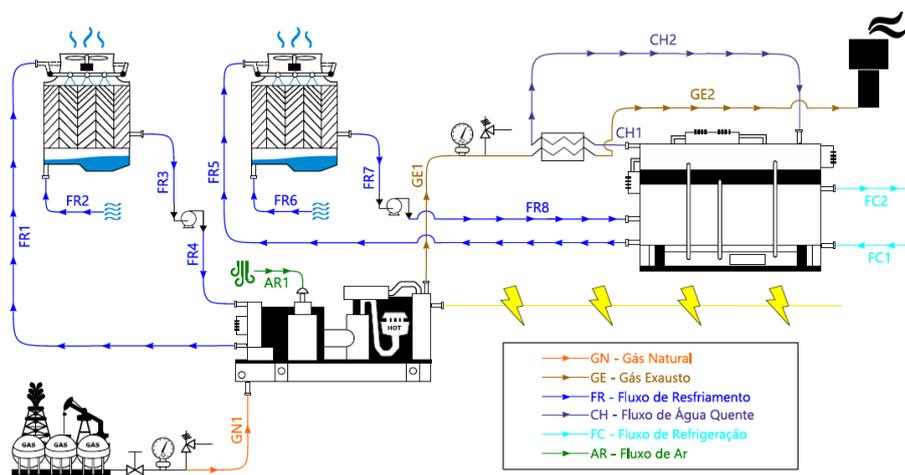


Figura 11 – Modelo do sistema de cogeração de energia utilizando um trocador de calor entre o motor alternativo e o *chiller* por absorção

Fonte: Autor

Segundo Maidment e Prosser (2000), a viabilidade para implantação de sistemas de cogeração de energia está relacionada com a utilização do sistema, no mínimo, em boa parte da vida útil (alto fator de capacidade) dos empreendimentos. Desse modo, os resultados encontrados neste estudo de caso foram divididos em três cenários:

No 1º cenário, o motor funcionou durante as 14 horas úteis do supermercado, com o *chiller* operando durante este mesmo período. No 2º cenário, tanto o motor quanto o *chiller* funcionaram durante 24 horas.

Por fim, no 3º cenário, o motor alternativo e o *chiller* funcionaram durante 14 horas, porém foi adicionado um reservatório térmico ao sistema, com o objetivo de produzir água congelada durante o dia para utilização nos racks de média temperatura (RMT) durante a noite.

Em todos os cenários, o custo de disponibilidade da demanda contratada, de 280 kW junto à concessionária, foi considerado.

7.3. CENÁRIO 1

Neste primeiro cenário, o motor alternativo funcionou em plena carga durante as 14 horas em que o empreendimento recebe clientes. Essa quantidade de tempo trabalhando foi suficiente para atender os racks de baixa temperatura (RBT), que continuaram funcionando com os sistemas de refrigeração por compressão.

O motor também atendeu a carga elétrica necessária para funcionamento dos computadores, iluminação e demais equipamentos; além de gerar uma carga extra de eletricidade, que foi injetada na rede e posteriormente consumida através do sistema de compensação de energia.

Essa energia compensada foi utilizada durante as 10 horas em que o supermercado permaneceu fechado, nos racks de baixa temperatura (RBT), no outdoor com a marca do empreendimento e na iluminação da guarita dos seguranças.

Com o funcionamento seguindo a mesma quantidade de horas que o motor alternativo, o *chiller* por absorção atendeu todo o sistema de ar condicionado, que refrigera as áreas comuns, além dos racks de média temperatura (RMT), que é utilizado para manutenção dos alimentos que precisam ser resfriados.

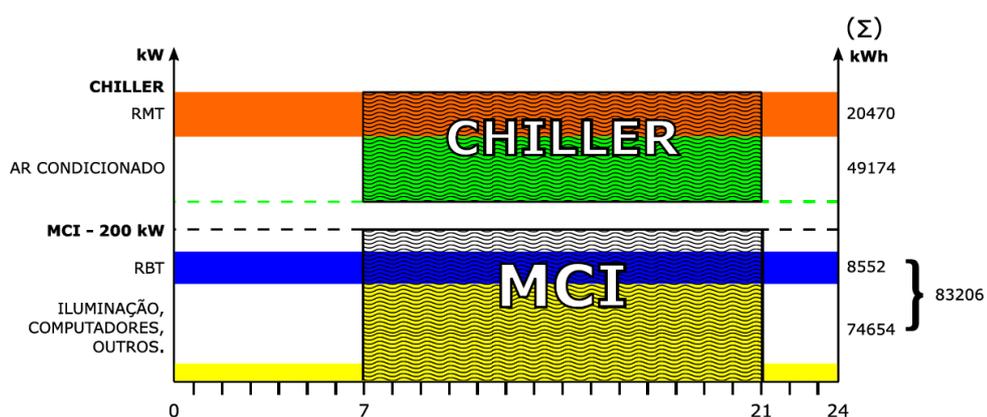


Figura 12. Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 1

Fonte: Autor

Neste cenário, durante as 10 horas em que o supermercado permanece fechado, houve necessidade de compra de eletricidade junto a concessionária de energia para alimentar os racks de média temperatura. A Figura 12 mostra o esquema de funcionamento proposto para o cenário 1.

Tabela 6. Mapa de correntes do sistema de cogeração de energia (cenário 1)

Fluxo	Descrição	Temp. (°C)	Pressão (kPa)	Vazão mássica (kg/s)
GN1	Gás natural para motor de combustão interna	25	101	0,011
AR1	Vazão de ar utilizado na combustão do motor	25	101	0,232
FR1	Vazão da água para resfriamento do motor	80	150	4,98
FR2	Reposição da água na torre	25	101	0,25
FR3	Fluxo da água da torre de resfriamento	70	101	4,98
FR4	Vazão da água da bomba 1 para o motor	70	601	4,98
FR5	Vazão da água para resfriamento do <i>chiller</i>	36,5	150	10,17
FR6	Reposição da água na torre	25	101	0,51
FR7	Vazão da água da torre de resfriamento	31	101	10,17
FR8	Vazão da água da bomba 2 para o <i>chiller</i>	31	601	10,17
GE1	Vazão do gás exausto até o trocador de calor	751	101	0,243
GE2	Vazão do gás exausto para a chaminé	120	101	0,243
FC1	Vazão da água para refrigeração (entrada)	13	601	5,03
FC2	Vazão da água para refrigeração (saída)	8	556	5,03
CH1	Vazão da água quente para alimentação	80	101	2,111
CH2	Vazão da água quente para alimentação	95	101	2,111

Fonte: Autor

A Tabela 6 mostra o mapa completo com os cálculos das correntes do sistema de cogeração proposto para o cenário 1. Todas as correntes do modelo apresentado na Figura 11 foram consideradas, incluindo a vazão do gás natural na tubulação de alimentação do motor alternativo e a vazão da água para refrigeração do motor e do *chiller*.

O catálogo do fabricante do motor a combustão informa que a necessidade de resfriamento do equipamento é de aproximadamente 670.280 BTU/h, ou seja, 196 kW. Foi considerada uma perda de 5% da vazão do fluxo de resfriamento para cálculo da água de reposição, considerando as perdas por arraste, evaporação e na purga das torres de resfriamento.

As bombas centrífugas, válvulas de segurança e manômetros que foram selecionados no mercado possuem capacidade ideal para funcionar no sistema proposto. Essa metodologia teve como objetivo tornar os resultados o mais próximo possível de uma aplicação original.

O balanço de energia entre o motor alternativo e o *chiller* por absorção foi realizado. O calor proveniente dos gases exaustos (E_{Ge}) foi de 169 kW e o calor necessário para alimentar o *chiller* (E_{Ch}) foi de 133 kW. Isso que significa que os equipamentos selecionados estão termodinamicamente equilibrados, através de um sistema funcional que pode ser implantado em casos reais.

A Tabela 7 mostra o balanço de massa dos volumes de controle MCI, *chiller*, trocador de calor, torres de resfriamento e bombas centrífugas da planta. Foi considerado que não há perda de massa quando o gás exausto passa pelo trocador de calor, quando o fluxo de água para arrefecimento é impulsionado através das bombas centrífugas, nem no fluxo de água quente utilizado no funcionamento do *chiller*.

Considerando a potência gerada pelo motor (E_g) em 200 kW, a capacidade de refrigeração do *chiller* em 105 kW (30 TR), um consumo de 55 m³ de gás natural por hora e o PCI 8.358 kcal por m³, a eficiência total do sistema de cogeração proposto no cenário 1 foi de 57,06%.

Tabela 7. Balanço de massa dos volumes de controle (Cenário 1)

Volume de Controle	Correntes envolvidas	Entradas (kg/s ou m³/h)	Saídas (kg/s ou m³/h)
MCI	GN1	$m_{Gn} = 0,011$	-
	AR1	$m_{Ar} = 0,232$	-
	GE1	-	$m_{Ge} = 0,243$
<i>Chiller</i>	CH1	$m_{\text{Água}(1)} = 2,111$	-
	CH2	-	$m_{\text{Água}(2)} = 2,111$
Trocador de Calor	GE1	$m_{Ge(1)} = 0,243$	-
	GE2	-	$m_{Ge(2)} = 0,243$
Torre de Resfriamento (MCI)	FR1	$m_{\text{Água}(1)} = 4,98$	-
	FR2	$m_{\text{Água}(2)} = 0,25$	-
	FR3	-	$m_{\text{Água}(3)} = 4,98$
Torre de Resfriamento (<i>Chiller</i>)	FR5	$m_{\text{Água}(5)} = 10,17$	-
	FR6	$m_{\text{Água}(6)} = 0,51$	-
	FR7	-	$m_{\text{Água}(7)} = 10,17$
Bomba Centrífuga (MCI)	FR3	$m_{\text{Água}(3)} = 4,98$	-
	FR4	-	$m_{\text{Água}(4)} = 4,98$
Bomba Centrífuga (<i>Chiller</i>)	FR7	$m_{\text{Água}(7)} = 10,17$	-
	FR8	-	$m_{\text{Água}(8)} = 10,17$

Fonte: Autor

Os resultados encontrados, conforme Tabela 8, demonstram a qualificação do projeto apresentado, com total adequação à legislação. A relação da energia térmica cedida pelo MCI (E_t) com a energia fornecida associada ao PCI do combustível (E_f) ficou igual a 25%, ou seja, superior ao mínimo de 15% exigido pela norma.

Tabela 8. Qualificação do sistema de cogeração

Et / Ef (1) e % Fc (2)		
Ef	534,52	kW
Ee	200	kW
Et	133	kW
X	2,14	
Et/Ef	25	%
Fc	49	%

Fonte: Autor

O resultado do fator de cogeração (F_c) ficou em 49%, também superior aos 41% mínimos exigidos. Isso mostra que o sistema de cogeração proposto pode usufruir dos benefícios e incentivos governamentais da cogeração qualificada.

Vale destacar que foram simulados motores com consumo de combustível maior que o equipamento selecionado e eles não se qualificaram. Isso se deve ao fato da legislação brasileira buscar beneficiar a aplicação de sistemas que utilizam motores mais eficientes.

A Tabela 9 apresenta uma projeção da nova conta de energia com o sistema de cogeração qualificado em operação, sem considerar o custo com aquisição do gás natural para funcionamento do motor alternativo. O custo com combustível é apresentado na Tabela 10.

Na simulação, o comportamento diário da conta de energia elétrica caiu de R\$ 3.067,30 para R\$ 252,54, representando uma redução substancial no custo com eletricidade no supermercado. O resultado encontrado da diferença na conta de energia mensal foi de R\$ 84.442,81. Esse valor foi utilizado como receita mensal na análise de investimento para implantação desse modelo.

Tabela 9. Simulação da conta de energia com o sistema de cogeração

Energia (kWh)	Consumo Ponta (kWh)	Consumo Fora de Ponta (kWh)	Geração Fora de Ponta (kWh)	Aquisição Fora de Ponta (kWh)	Disponibilidade (R\$)	Total da Fatura (R\$)
152.850	32.850	120.000	111.471	8.529	3.690,57	7.576,15

Fonte: Autor

Tabela 10. Custo com combustível no sistema de cogeração no cenário 1

Motor alternativo (kW)	Consumo a 100% de carga (m³/h)	Custo com gás natural (m³/semana)	Tarifa do gás natural com impostos (R\$/m³)	Custo com gás natural (R\$/mês)
200	55	5390	1,4921	32.169,68

Fonte: Autor

O investimento total necessário para aplicação do cenário 1 foi de R\$ 886.436,90, incluindo os principais equipamentos para implantação do sistema.

Considerando o combustível, a manutenção, a operação e a depreciação dos equipamentos, o custo mensal para o modelo foi de R\$ 44.376,78.

Tanto o investimento com obra civil quanto a *startup* da planta foi precificado pelos fabricantes dos equipamentos. A Tabela 11 mostra o mapa de investimento detalhado e a Tabela 12 a relação de despesas e receitas para este cenário.

Tabela 11. Mapa de investimento

Investimento	Valor (R\$)
Motor alternativo	435.070,90
<i>Chiller</i> por absorção	166.320,00
Torre de resfriamento para o motor	7.774,00
Torre de resfriamento para o <i>chiller</i>	26.716,00
Bomba centrífuga para o motor	9.874,00
Bomba centrífuga para o <i>chiller</i>	15.832,00
Obra civil no supermercado	10.000,00
<i>Startup</i> da planta	14.850,00
Instalação	200.000,00
TOTAL	886.436,90

Fonte: Autor

Tabela 12. Mapa de despesa e receita

Despesa	Valor (R\$)
Combustível (Gás natural)	32.169,68
Manutenção dos equipamentos	2.954,79
Operação dos equipamentos	5.909,58
Depreciação	3.342,73
TOTAL	44.376,78

Receita	Valor (R\$)
Receita operacional da energia	84.442,81
TOTAL	84.442,81

Fonte: Autor

Com o fluxo de caixa anual líquido positivo em R\$ 480.792,36, os resultados finais encontrados da análise financeira para este cenário foram favoráveis. O valor presente líquido (VPL) encontrado foi de R\$ 958.440,21, com um *payback* de 3,6 anos.

A taxa interna de retorno (TIR) mensal encontrada foi de 4,4% a.m., portanto, superior à taxa de atratividade (TA) considerada, que foi de 1,53% ao mês (20% ao ano). O fluxo de caixa anual completo, com o valor presente (VP) descontado e demais indicadores é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros

Ano	Fluxo de caixa (R\$)	VP descontado	VP acumulado
00	-886.436,90	-886.436,90	-886.436,90
01	480.792,36	400.660,30	-485.776,60
02	480.792,36	333.883,58	-151.893,02
03	480.792,36	278.236,32	126.343,30
04	480.792,36	231.863,60	358.206,90
05	480.792,36	193.219,67	551.426,57
06	480.792,36	161.016,39	712.442,95
07	480.792,36	134.180,32	846.623,28
08	480.792,36	111.816,94	958.440,21
VPL	958.440,21	TIR	4,4% a.m.
		Payback	3,6 anos

Fonte: Autor

7.4. CENÁRIO 2

Apesar da implantação de sistemas de cogeração em supermercados ser considerada um alto investimento, pode haver um rápido retorno sobre o capital investido, desde que o sistema funcione 24 horas por dia em boa parte dos dias do ano, considerando o período de manutenção do sistema (Maidment e Prosser, 2000).

O cenário 2 segue essa premissa, com o motor alternativo e o *chiller* por absorção funcionando 24 horas por dia. Nesta simulação, não houve necessidade de aquisição da energia elétrica via concessionária. O motor de 130 kW atendeu toda a demanda elétrica necessária para funcionamento do supermercado, incluindo os racks de baixa temperatura (RBT).

Apesar da potência desse motor ser menor que a proposta no cenário 1, o seu funcionamento, mesmo em horário noturno, onde o empreendimento está fechado,

proporcionou uma geração de eletricidade maior que a necessária durante a noite; mas que foi compensada durante o dia, para atender principalmente os racks de baixa temperatura (RBT).

O *chiller* por absorção selecionado para este cenário foi o mesmo proposto no cenário 1, com capacidade para 30 TR. Este equipamento atendeu toda a necessidade de carga térmica, durante o dia refrigerou as áreas comuns e atendeu aos racks de média temperatura (RMT). Durante a noite atendeu somente aos RMT's.

A Figura 13 mostra o esquema de funcionamento proposto para o cenário 2.

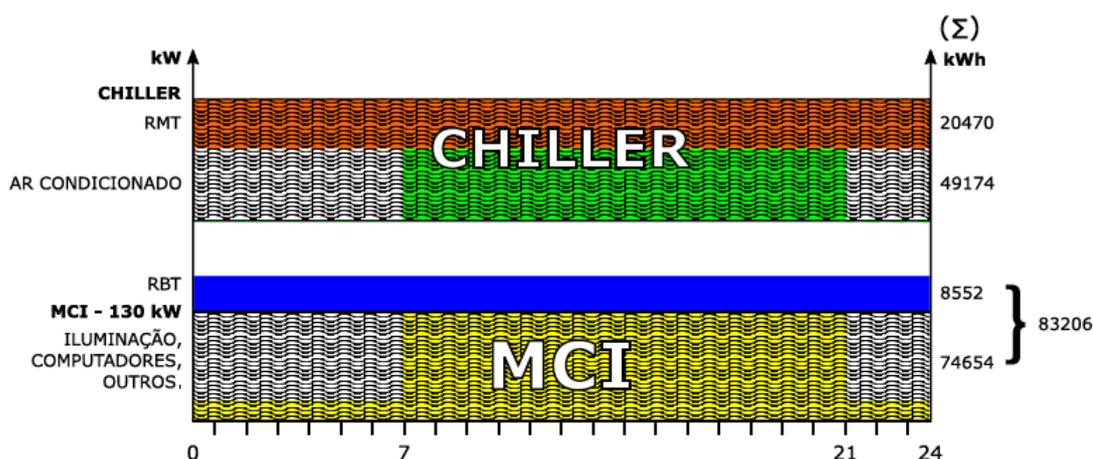


Figura 13. Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 2

Fonte: Autor

A mesma metodologia de cálculo utilizada no cenário 1 foi considerada, incluindo os 5% de perda na água de resfriamento e a seleção de equipamentos com o objetivo de apresentar um sistema prático e funcional.

O modelo funcionou com um balanço de energia (calor) de 135 kW, proveniente dos gases exaustos (E_{Ge}), e com 133 kW, que é resultando da potência necessária para funcionamento do *chiller* (E_{Ch}). O cálculo das correntes é apresentado conforme Tabela 14.

A Tabela 15 mostra o balanço de massa dos volumes de controle selecionados no cenário 2: MCI, *chiller*, trocador de calor, torres de resfriamento e bombas

centrífugas da planta. Também foi considerado as mesmas premissas apresentadas no cenário anterior.

Tabela 14. Mapa de correntes do sistema de cogeração de energia (cenário 2)

Fluxo	Descrição	Temp. (°C)	Pressão (kPa)	Vazão mássica (kg/s)
GN1	Gás natural para motor de combustão interna	25	101	0,009
AR1	Vazão de ar utilizado na combustão do motor	25	101	0,247
FR1	Vazão da água para resfriamento do motor	80	150	1,63
FR2	Reposição da água na torre	25	101	0,08
FR3	Vazão da água da torre de resfriamento	67	101	1,63
FR4	Vazão da água da bomba 1 para o motor	67	601	1,63
FR5	Vazão da água para resfriamento do <i>chiller</i>	36,5	150	10,17
FR6	Reposição da água na torre	25	101	0,51
FR7	Vazão da água da torre de resfriamento	31	101	10,17
FR8	Vazão da água da bomba 2 para o <i>chiller</i>	31	601	10,17
GE1	Vazão do gás exausto até o trocador de calor	600	101	0,256
GE2	Vazão do gás exausto para a chaminé	120	101	0,256
FC1	Vazão da água para refrigeração (entrada)	13	601	5,03
FC2	Vazão da água para refrigeração (saída)	8	556	5,03
CH1	Vazão da água quente para alimentação	80	101	2,111
CH2	Vazão da água quente para alimentação	95	101	2,111

Fonte: Autor

Considerando a potência gerada pelo motor (E_g) em 130 kW, a capacidade de refrigeração do *chiller* em 105 kW (30 TR), um consumo de 40 m³ de gás natural

por hora e o PCI 8.358 kcal por m³, a eficiência total do sistema de cogeração proposto no cenário 2 foi de 60,45%.

Tabela 15. Balanço de massa dos volumes de controle (Cenário 2)

Volume de Controle	Correntes envolvidas	Entradas (kg/s ou m³/h)	Saídas (kg/s ou m³/h)
MCI	GN1	m _{GN} = 0,009	-
	AR1	m _{Ar} = 0,247	-
	GE1	-	m _{Ge} = 0,256
<i>Chiller</i>	CH1	m _{Água(1)} = 2,111	-
	CH2	-	m _{Água(2)} = 2,111
Trocador de Calor	GE1	m _{Ge(1)} = 0,256	-
	GE2	-	m _{Ge(2)} = 0,256
Torre de Resfriamento (MCI)	FR1	m _{Água(1)} = 1,63	-
	FR2	m _{Água(2)} = 0,08	-
	FR3	-	m _{Água(3)} = 1,63
Torre de Resfriamento (<i>Chiller</i>)	FR5	m _{Água(5)} = 10,17	-
	FR6	m _{Água(6)} = 0,51	-
	FR7	-	m _{Água(7)} = 10,17
Bomba Centrífuga (MCI)	FR3	m _{Água(3)} = 1,63	-
	FR4	-	m _{Água(4)} = 1,63
Bomba Centrífuga (<i>Chiller</i>)	FR7	m _{Água(7)} = 10,17	-
	FR8	-	m _{Água(8)} = 10,17

Fonte: Autor

Conforme Tabela 16, o projeto proposto no cenário 2 também atendeu a legislação braseira e se tornou qualificado. A relação da energia térmica cedida pelo MCI (E_t) com a associada ao PCI do GN (E_f) ficou igual a 34%. O fator de cogeração (F_c) ficou em 49%, igual ao modelo proposto no cenário 1.

Tabela 16. Qualificação do sistema de cogeração

Et / Ef (1) e % Fc (2)		
E _f	388,74	kW
E _e	130	kW
E _t	133	kW
X	2,14	
Et/Ef	34	%
Fc	49	%

Fonte: Autor

A nova conta de energia com o modelo proposto no cenário 2 é apresentada conforme Tabela 17. Com o custo com eletricidade caindo em relação ao cenário 1, de R\$ 7.576,15 para R\$ 3.690,57, percebe-se que esse novo modelo é mais eficiente também no quesito financeiro.

Por consumir menos combustível que o motor proposto no cenário anterior, esse modelo se enquadra em uma tarifa de aquisição do gás natural maior. Os valores considerados e o custo com combustível são apresentados em Tabela 18. Mesmo com esse custo de aquisição maior, a diferença total encontrada na conta de energia foi de R\$ 88.328,40; esse mesmo valor foi utilizado como receita mensal na análise de investimentos.

Tabela 17. Simulação da conta de energia com o sistema de cogeração

Energia (kWh)	Consumo Ponta (kWh)	Consumo Fora de Ponta (kWh)	Geração Fora de Ponta (kWh)	Aquisição Fora de Ponta (kWh)	Disponibilidade (R\$)	Total da Fatura (R\$)
152.850	32.850	120.000	120.000	0	3.690,57	3.690,57

Fonte: Autor

Tabela 18. Custo com combustível no sistema de cogeração no cenário 2

Motor alternativo (kW)	Consumo a 100% de carga (m³/h)	Custo com gás natural (m³/semana)	Tarifa do gás natural com impostos (R\$/m³)	Custo com gás natural (R\$/mês)
130	40	3920	1,5608	24.473,34

Tabela 19. Mapa de investimento

Investimento	Valor (R\$)
Motor alternativo	351.180,33
<i>Chiller</i> por absorção	166.320,00
Torre de resfriamento para o motor	7.774,00
Torre de resfriamento para o <i>chiller</i>	26.716,00
Bomba centrífuga para o motor	9.874,00
Bomba centrífuga para o <i>chiller</i>	15.832,00
Obra civil no supermercado	10.000,00
Startup da planta	14.850,00
Instalação	200.000,00
TOTAL	802.546,33

Fonte: Autor

Para implantação do modelo apresentado no cenário 2, o investimento total encontrado foi de R\$ 802.546,33, ou seja, menor que o apresentado no cenário 1, em função da aquisição de um motor alternativo com menor potência.

O custo mensal para o modelo ficou em R\$ 35.375,24, também menor que o cenário anterior em função do menor consumo com combustível. O mapa de investimento completo é apresentado na Tabela 19 e a relação das despesas e receitas na Tabela 20.

Tabela 20. Mapa de despesa e receita

Despesa	Valor (R\$)
Combustível (Gás natural)	24.473,34
Manutenção dos equipamentos	2.675,15
Operação dos equipamentos	5.350,31
Depreciação	2.876,44
TOTAL	35.375,24

Receita	Valor (R\$)
Receita operacional da energia	88.328,40
TOTAL	88.328,40

Fonte: Autor

Tabela 21. Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros

Ano	Fluxo de caixa (R\$)	VP descontado	VP acumulado
00	-802.546,33	-802.546,33	-802.546,33
01	635.437,89	529.531,57	-273.014,76
02	635.437,89	441.276,31	168.261,56
03	635.437,89	367.730,26	535.991,81
04	635.437,89	306.441,88	842.433,70
05	635.437,89	255.368,24	1.097.801,93
06	635.437,89	212.806,86	1.310.608,80
07	635.437,89	177.339,05	1.487.947,85
08	635.437,89	147.782,54	1.635.730,39
VPL	1.635.730,39	TIR	6,5% a.m.
		Payback	2,6 anos

Fonte: Autor

Com a redução no valor do investimento e dos custos, considerando um maior valor da receita mensal, os resultados finais encontrados para esse modelo também foram favoráveis. Com um fluxo anual líquido positivo em R\$ 635.437,89, o valor presente líquido (VPL) encontrado foi de R\$ 1.635.730,39.

A taxa interna de retorno (TIR) mensal encontrada foi de 6,5% e o *payback* descontado de 2,6 anos. O fluxo de caixa completo, com o valor presente (VP) descontado e demais indicadores é apresentado na Tabela 21.

7.5. CENÁRIO 3

Com o objetivo de acumular água congelada durante o dia para ser utilizada à noite nos racks de média temperatura (RMT), um reservatório térmico foi adicionado ao sistema proposto no cenário 1. O funcionamento do motor (200 kW) segue o mesmo padrão apresentado no primeiro cenário.

A quantidade de horas que o *chiller* por absorção (30 TR) trabalhou também foi a mesma, com a diferença que uma porção maior de água gelada produzida foi direcionada para o acumulador. Isso pode ser observado na área hachurada branca do *chiller*, na Figura 14.

O mapa dos cálculos das correntes para esse cenário é o mesmo apresentado na Tabela 6. O balanço de energia e o consumo de combustível do motor alternativo também seguiu o mesmo padrão do primeiro cenário.

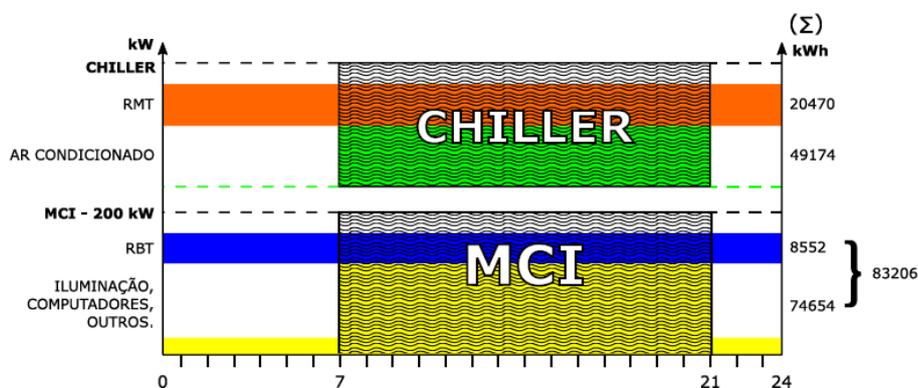


Figura 14. Esquema de utilização do sistema de cogeração no cenário 3

Fonte: Autor

A eficiência total do sistema de cogeração proposto no cenário 3 foi a mesma apresentada no cenário 1 (57,06%), já que foi utilizado os mesmos equipamentos. O modelo proposto neste cenário também se qualificou perante a legislação brasileira e segue os mesmos resultados apresentados no cenário 1.

Como o acumulador conservou a água gelada para utilização durante a noite nos racks de média temperatura (RMT), toda a carga térmica do empreendimento foi atendida, o que resultou na conta de energia igual ao cenário 2; com uma receita operacional da energia de R\$ 88.328,40.

Tabela 22. Mapa de investimento

Investimento	Valor (R\$)
Motor alternativo	435.070,90
<i>Chiller</i> por absorção	166.320,00
Torre de resfriamento para o motor	7.774,00
Torre de resfriamento para o <i>chiller</i>	26.716,00
Bomba centrífuga para o motor	9.874,00
Bomba centrífuga para o <i>chiller</i>	15.832,00
Obra civil no supermercado	10.000,00
Startup da planta	14.850,00
Reservatório térmico	95.634,00
Instalação	200.000,00
TOTAL	982.070,90

Fonte: Autor

Tabela 23. Mapa de despesa e receita

Despesa	Valor (R\$)
Combustível (Gás natural)	32.169,68
Manutenção dos equipamentos	3.273,57
Operação dos equipamentos	6.547,14
Depreciação	3.342,73
TOTAL	45.333,12

Receita	Valor (R\$)
Receita operacional da energia	88.328,40
TOTAL	88.328,40

Fonte: Autor

As diferenças encontradas nesse cenário se encontram na análise de investimentos. O valor encontrado para aquisição do reservatório térmico foi de R\$

95.634,00, representando um incremento alto no investimento total, que ficou em R\$ 982.070,90.

O compra do acumulador também influenciou na despesa mensal, já que houve um aumento nos custos com manutenção e operação dos equipamentos. A Tabela 22 mostra o mapa de investimento detalhado e a Tabela 23 a relação de despesas e receitas para este cenário.

Em função da receita mensal ser suficiente para suportar os desdobramentos da aquisição do acumulador, os indicadores financeiros para esse cenário se mostraram favoráveis. O valor presente líquido (VPL) foi positivo em R\$ 997.686,22 e a taxa interna de retorno de 4,2% a.m. O fluxo de caixa completo, com o valor presente (VP) descontado e demais indicadores é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24. Fluxo de caixa anual com indicadores financeiros

Ano	Fluxo de caixa (R\$)	VP descontado	VP acumulado
00	-982.070,90	-982.070,90	-982.070,90
01	515.943,36	429.952,80	-552.118,10
02	515.943,36	358.294,00	-193.824,10
03	515.943,36	298.578,33	104.754,23
04	515.943,36	248.815,28	353.569,51
05	515.943,36	207.346,06	560.915,57
06	515.943,36	172.788,39	733.703,96
07	515.943,36	143.990,32	877.694,28
08	515.943,36	119.991,94	997.686,22
VPL	997.686,22	TIR	4,2% a.m.
		Payback	3,7 anos

Fonte: Autor

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1. INDICADOR TÉCNICO (AT)

Os resultados encontrados da aplicação do indicador de adequação termodinâmica (AT) foram discretizados de acordo com a fonte de energia requerida para funcionamento dos *chillers* por absorção.

Para *chiller* por absorção operado a água quente, os resultados da AT são apresentados conforme Tabela 25 e Figura 15. A linha de adequação termodinâmica (AT) indica que boa parte da energia (calor) dos gases exaustos está sendo empregada para gerar capacidade de refrigeração, o que representa combinações de sistemas ideais.

Sistemas com $AT=1,2$, apresentam adequação térmica entre o motor alternativo de 135 kW e um *chiller* por absorção de 30 TR. Essa mesma configuração foi aplicada no estudo de caso que foi apresentado nessa dissertação.

Tabela 25. Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por água quente

PE (kW)	m GE (kg/s)	E _{Ge} (kW)	Fonte: <i>Chiller</i>	Vazão mássica: da água (kg/s)	E _{Ch} (kW)	COP	Capacidade (TR)	AT
40	0,188	79	Água Quente	2,111	133	0,83	19	0,61
72	0,208	99		2,111	133	0,83	23	0,88
108	0,226	119		2,111	133	0,83	28	1,09
135	0,256	135		2,111	133	0,83	32	1,21
200	0,243	169		2,639	166	0,83	40	1,43
276	0,269	186		2,917	184	0,83	44	1,79
340	0,288	206		3,250	205	0,83	49	1,99
432	0,313	224		3,528	222	0,83	53	2,33

Fonte: Autor

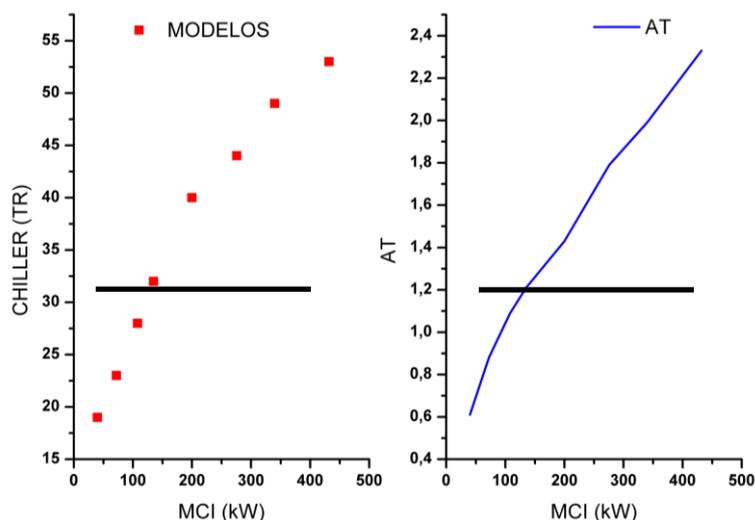


Figura 15 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por água quente

Fonte: Autor

Sistemas operando abaixo da linha guia ($AT < 1,2$), mesmo apresentando adequação termodinâmica, esbarram em uma restrição tecnológica nos *chillers* por absorção, já que 30 TR foi a menor potência encontrada no mercado para esse equipamento (não há *chiller* comercial para atender AT). Já os modelos operando acima da linha guia ($AT > 1,2$), indicam que os sistemas são funcionais e pode operar com *chiller* variando de 30 a 53 TR, a depender a potência do motor.

Caso seja a necessidade do empreendimento, os modelos com indicador maior que 1,2 (funcionais) também podem compensar uma produção extra de energia elétrica, desde que haja uma menor necessidade na carga de energia térmica.

Para os equipamentos por absorção operados a vapor, os resultados dos modelos são apresentados na Tabela 26 e Figura 16. A capacidade de refrigeração dos *chillers* encontrados no mercado e compatíveis com os motores alternativos empregados neste estudo se iniciam em 45 TR.

Tabela 26. Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por vapor

PE (kW)	m GE (kg/s)	E _{Ge} (kW)	Fonte: Chiller	Vazão mássica vapor (kg/s)	E _{Ch} (kW)	COP	Capacidade (TR)	AT
40	0,188	79	Vapor	0,094	197	0,81	18	0,63
72	0,208	99		0,094	197	0,81	23	0,90
108	0,226	119		0,094	197	0,81	27	1,12
135	0,256	135		0,094	197	0,81	31	1,24
200	0,243	169		0,094	197	0,81	39	1,46
276	0,269	186		0,094	197	0,81	43	1,83
340	0,288	206		0,094	197	0,81	47	2,04
432	0,313	224		0,094	197	0,81	52	2,38

Fonte: Autor

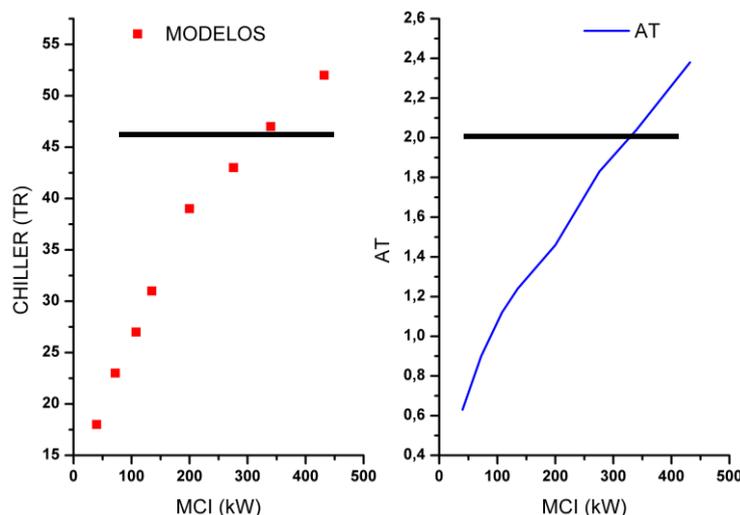


Figura 16 – Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por vapor

Fonte: Autor

Os modelos que operam abaixo da linha guia ($AT < 2,0$), ou seja, com motores alternativos de 40 a 276 kW, apresentaram restrição tecnológica, que é maior se comparado com os resultados apresentados nos modelos que utilizam *chiller* operado a água quente. Sistemas com $AT = 2,0$ operam com motor alternativo de 340 kW e *chiller* por absorção de 45 TR.

Modelos operando acima dessa linha guia ($AT > 2,0$) apresentam um balanço de energia equilibrado e funcional, com um melhor aproveitamento da energia dissipada e absorvida. Neste caso, os sistemas funcionais podem operar com *chiller* de 45 a 52 TR. Se a carga térmica necessária para o empreendimento for menor que 52 TR, poderá haver compensação da energia elétrica produzida.

Os *chillers* que trabalham com conexão direta dos gases da exaustão possuem a característica de possuírem um Coeficiente de Performance (COP) maior que os operados a água quente ou vapor. Os modelos comercializados no Brasil, que se enquadram aos motores alternativos estudados, se iniciam com capacidade de refrigeração de 50 TR.

Os resultados das simulações para esse tipo de equipamento são apresentados conforme Tabela 27 e Figura 17. Modelos com $AT = 0,7$ operam com um motor de 135 kW e *chiller* de 50 TR.

Sistemas trabalhando abaixo da linha guia ($AT < 0,7$) possuem restrição tecnológica. Já os modelos operando acima da linha guia ($AT > 0,7$), ou seja, funcionais, trabalham com *chiller* variando de 50 a 87 TR, a depender da potência do motor.

Seguindo a mesma lógica dos modelos apresentados anteriormente (que operam com *chillers* utilizando outra fonte de energia), as simulações com indicador maior que 0,7 indicam que poderá haver compensação de energia. Neste caso deverá haver uma produção extra da eletricidade e uma menor demanda na carga térmica do empreendimento.

Tabela 27. Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por gás exausto

PE (kW)	m_{Ge} (kg/s)	E_{Ge} (kW)	Fonte: <i>Chiller</i>	m_{Ge} (kg/s)	E_{Ch} (kW)	COP	Capacidade (TR)	AT
40	0,188	79		0,256	107	1,36	30	0,37
72	0,208	99		0,256	121	1,36	38	0,54
108	0,226	119		0,256	135	1,36	46	0,67
135	0,256	135	Gás	0,256	135	1,36	52	0,74
200	0,243	169	Exausto	0,243	169	1,36	65	0,87
276	0,269	186		0,269	186	1,36	72	1,09
340	0,288	206		0,288	206	1,36	80	1,21
432	0,313	224		0,313	224	1,36	87	1,42

Fonte: Autor

Nota-se que os sistemas com *chillers* alimentados por gases da exaustão, por possuírem um Coeficiente de Performance (COP) maior que os operados por água quente ou vapor, possuem maiores capacidades de refrigeração com mesma potência elétrica. Esse comportamento pode ser observado na Figura 17, onde a linha ideal (AT) está deslocada para baixo, se comparado com os outros modelos.

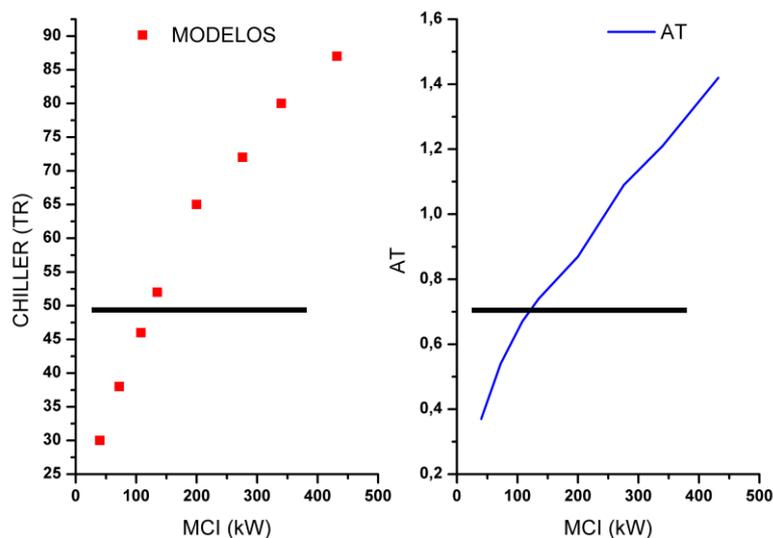


Figura 17. Aplicação do indicador AT em modelos de cogeração com *chillers* alimentados por gás exausto

Fonte: Autor

Fazendo um comparativo entre as simulações envolvendo os *chillers* operados a água quente, vapor e gases da exaustão, a região acima e a esquerda da linha de AT representa sistemas sem adequação termodinâmica, ou seja, não existe energia residual suficiente para alimentar o *chiller* por absorção.

Os modelos com *chillers* operados a vapor são os que possuem maior restrição tecnológica, seguido pelos *chillers* operados a gás exausto e água quente. Esse comportamento mostrou que apenas dois modelos, utilizando as potências dos motores alternativos em 340 e 432 kW, se apresentaram funcionais.

Os *chillers* operados com os gases da exaustão e água quente são os que possuem uma maior quantidade de sistemas funcionais, mesmo considerando que

os equipamentos operados a gases exaustos se iniciam com capacidade de refrigeração de 50 TR.

8.2. INDICADOR AMBIENTAL (kg CO₂/h)

O grau de emissão de dióxido de carbono (CO₂) dos modelos simulados, utilizando a energia da matriz elétrica Brasileira (sem considerar o funcionamento do sistema de cogeração), são apresentados conforme Tabela 28 mais as Figuras 18 e 19. Os sistemas que possuíram restrição tecnológica, ou seja, não funcionais, foram descartados nesta simulação.

Nota-se que o maior grau de emissão de CO₂ ocorreu no ano de 2014, período em que o Brasil passou por uma grave crise hídrica, causada pela falta de chuvas. Crise esta, que obrigou o país a utilizar uma quantidade maior de termelétricas para produção de eletricidade (GLOBO, 2014).

Tabela 28. Emissão de CO₂ dos modelos utilizando energia da matriz brasileira

PE (kW)	Fonte Chiller	COP = 3 ET (kW)	Total (kW)	2014 kg CO ₂ /h	2015 kg CO ₂ /h	2017 kg CO ₂ /h
135		37	172	22,7	20,8	16,1
200	Água Quente	47	247	32,5	29,8	23,0
276		51	327	43,1	39,6	30,6
340		57	397	52,3	48,0	37,1
432		62	494	65,0	59,7	46,1
340	Vapor	56	396	52,1	47,8	36,9
432		60	492	64,8	59,5	46,0
135		61	196	25,8	23,7	18,3
200	Gás Exausto	76	276	36,4	33,4	25,8
276		84	360	47,4	43,6	33,7
340		93	433	57,0	52,4	40,5
432		101	533	70,2	64,5	49,8

Fonte: Autor

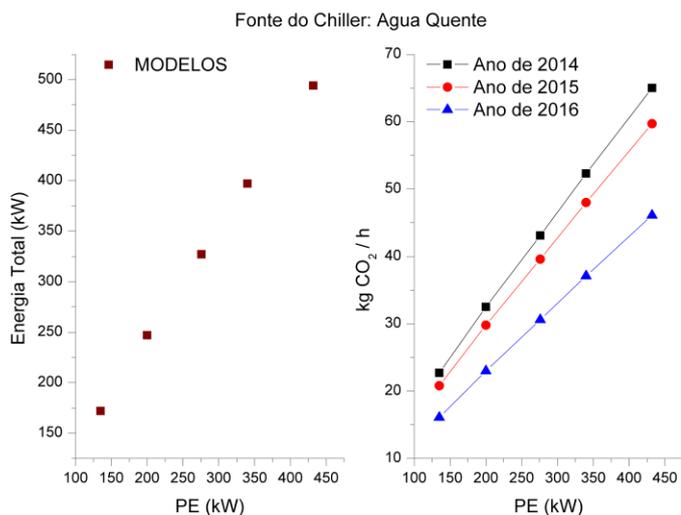


Figura 18. Emissão de CO₂ dos modelos com *chiller* operado a água quente, utilizando energia da matriz elétrica brasileira

Fonte: Autor

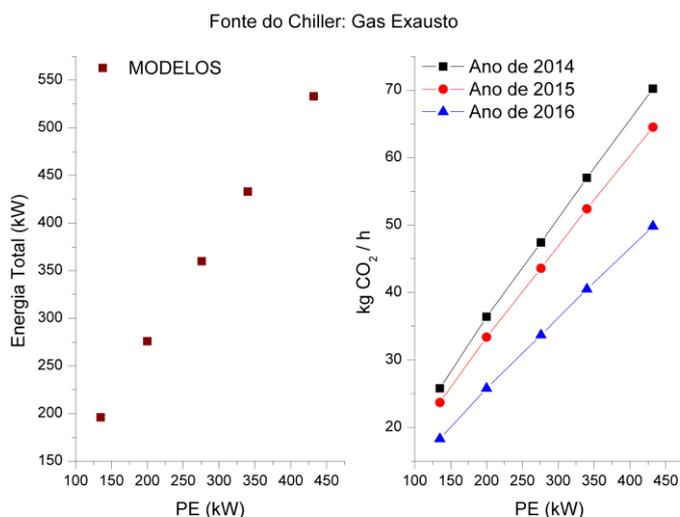


Figura 19. Emissão de CO₂ dos modelos com *chiller* operado a gás exausto, utilizando energia da matriz elétrica brasileira

Fonte: Autor

Com o sistema de cogeração operando nos modelos, o grau de emissão de dióxido de carbono (CO₂) é apresentado conforme Tabela 29 mais as Figuras 20 e 21. Mesmo com a porção de energia térmica (água gelada) produzida pelo *chiller* sendo considerada isenta de emissão de CO₂, nota-se que a emissão desse poluente é bem maior com os sistemas de cogeração em funcionamento.

Tabela 29. Simulação da emissão de CO₂ com o sistema de cogeração em funcionamento

PE (kW)	Consumo do Gn (m ³ /h)	PCI (kcal/m ³)	Fator (kg CO ₂ /kcal)	kg CO ₂ /h	Fonte Chiller	Carga térmica (kW)	kg CO ₂ /h	TOTAL: kg CO ₂ /h
135	40			78,5		37	0	78,5
200	55			107,9	Água Quente	47	0	107,9
276	76	8358	0,000235	149,1		51	0	149,1
340	95			186,4		57	0	186,4
432	117			229,5		62	0	229,5
340	95	8358	0,000235	186,4	Vapor	56	0	186,4
432	117			229,5		60	0	229,5
135	40			78,5		61	0	78,5
200	55			107,9	Gás Exausto	76	0	107,9
276	76	8358	0,000235	149,1		84	0	149,1
340	95			186,4		93	0	186,4
432	117			229,5		101	0	229,5

Fonte: Autor

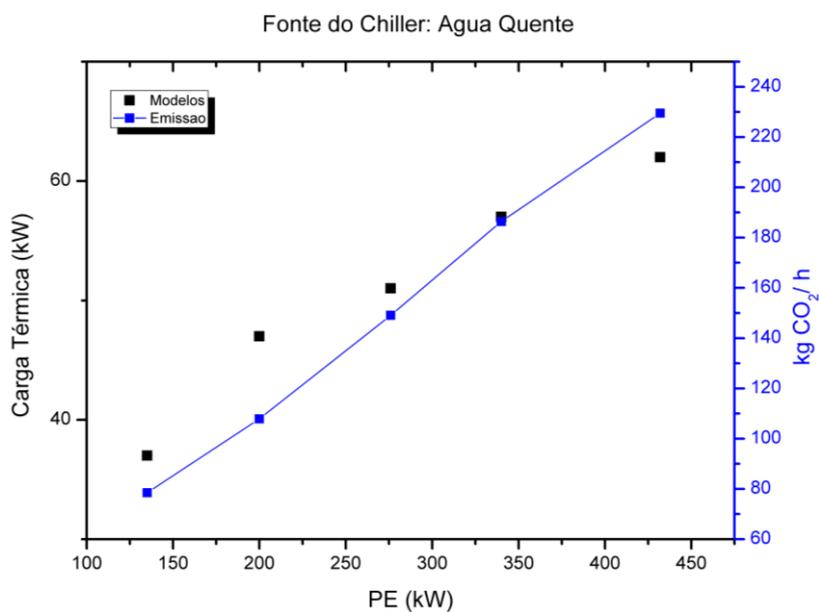


Figura 20. Simulação da emissão de CO₂ com o sistema de cogeração com *chiller* operado a água quente

Fonte: Autor

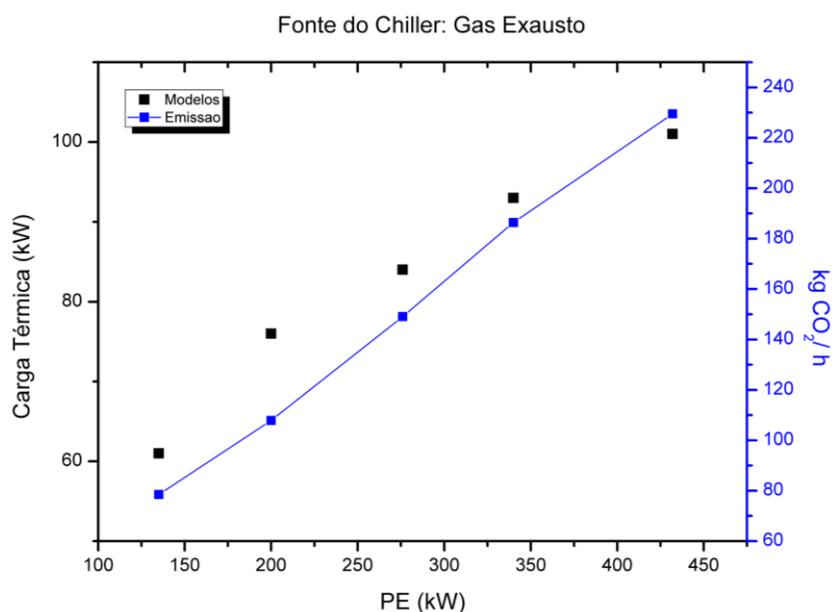


Figura 21. Simulação da emissão de CO₂ com o sistema de cogeração com *chiller* operado a gás exausto

Fonte: Autor

Os resultados finais encontrados vão de encontro aos apresentados por diversos pesquisadores de sistemas de cogeração, que indicam essa forma de geração de energia como ambientalmente favorável (Maidment et al, 1999; Maidment e Prosser, 2000; Sugiarta et al., 2009; Arteconi, Brandoni e Polanara 2009; Isa, Tan e Yatim, 2017; Moussawi, Fardoun e Louahlia, 2017).

A Tabela 30 mais as Figuras 22 e 23 apresentam esse comparativo final e indicam que os sistemas de cogeração aplicados no Brasil são mais poluentes, se comparado com os modelos utilizando a eletricidade gerada pela matriz nacional; seja qual for a quantidade de carga elétrica e térmica demandada pelo empreendimento ou indústria.

Essa particularidade acontece em função da matriz brasileira ser composta basicamente pela geração hidrelétrica, que é bem menos poluente que as matrizes dos países de origem dos pesquisadores mencionados.

Segundo Flórez-Orrego, Silva e Oliveira Jr (2014), nos últimos anos, a taxa média de emissão de CO₂ no planeta ficou em 721 tCO₂/GWh, enquanto que 462 tCO₂/GWh representa a parcela de todos os países presentes na EUROPA. Se

compararmos a emissão brasileira de 2014 (131,62 tCO₂/GWh) com a média de emissão, por exemplo, da ESPANHA, que é de 455 tCO₂/GWh (Marimón et al., 2011); a matriz do Brasil ainda possui uma grande vantagem na produção de eletricidade com uma menor emissão desse poluente.

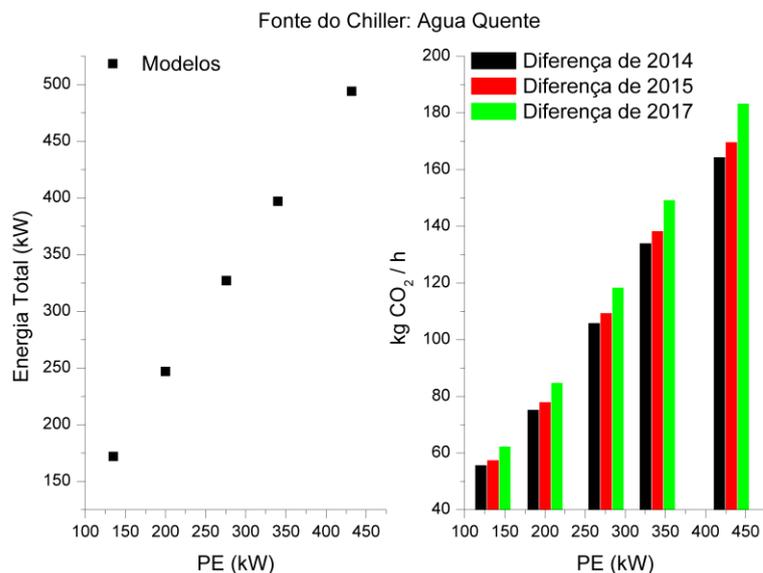


Figura 22. Diferença da emissão de CO₂ entre os sistemas de cogeração com *chiller* operado a água quente e a energia da matriz elétrica brasileira

Fonte: Autor

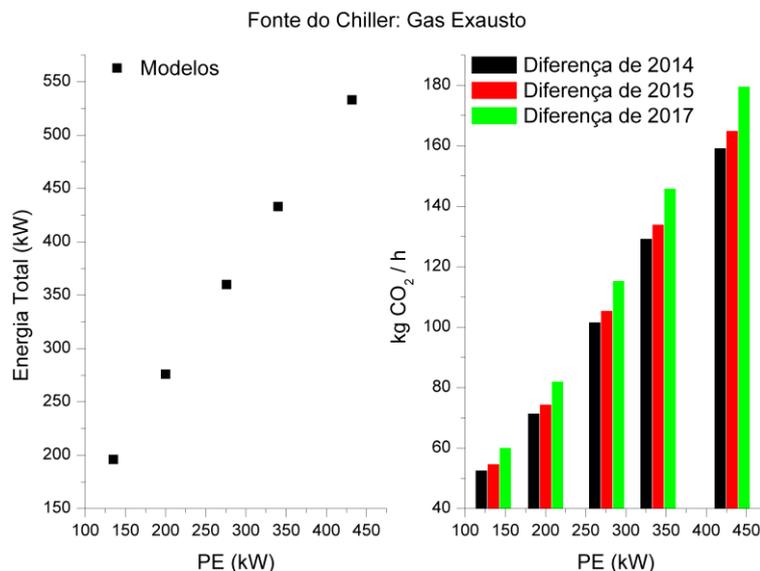


Figura 23. Diferença da emissão de CO₂ entre os sistemas de cogeração com *chiller* operado a gás exausto e a energia da matriz elétrica brasileira

Fonte: Autor

Tabela 30. Diferença da emissão de CO₂ entre os sistemas de cogeração e a energia na matriz elétrica brasileira

PE (kW)	Fonte Chiller	COP = 3 ET (kW)	Total (kW)	Diferença 2014 kg CO ₂ /h	Diferença 2015 kg CO ₂ /h	Diferença 2017 kg CO ₂ /h
135		37	172	55,8	57,6	62,4
200	Água Quente	47	247	75,4	78,1	84,9
276		51	327	106,0	109,5	118,5
340		57	397	134,1	138,4	149,3
432		62	494	164,5	169,8	183,4
340		Vapor	56	396	134,3	138,5
432	60		492	164,7	170,0	183,5
135		61	196	52,7	54,8	60,2
200	Gás Exausto	76	276	71,5	74,5	82,1
276		84	360	101,7	105,5	115,4
340		93	433	129,3	134,0	145,9
432		101	533	159,3	165,0	179,7

Fonte: Autor

8.3. INDICADOR ECONÔMICO (VEO)

Seguindo o mesmo critério do indicador ambiental que foi apresentado, as simulações para aplicação do indicador de viabilidade econômica operacional (VEO) foram realizadas para cada nível de potência estudada, porém só foi considerado para cálculo os sistemas que se apresentaram funcionais pelo indicador AT.

O custo secundário da energia elétrica para funcionamento do motor alternativo e do *chiller* por absorção foi desprezado (bombas e ventiladores). Os resultados encontrados utilizando o VEO são apresentados conforme Tabela 31 e Figura 24.

O VEO indicou que todos os sistemas de cogeração funcionais são viáveis economicamente para operação diária. É importante frisar que o resultado favorável (porém próximo a zero) se deve aos preços praticados na comercialização do gás natural (período de alta no mercado) e da eletricidade (bandeira verde) no momento das simulações.

Vale destacar que sistemas funcionando com *chiller* por absorção operado a gás exausto apresentaram VEO consideravelmente maior que os outros sistemas, logo possuem resultados mais próximos à viabilidade operacional ($\frac{R\$}{kWh}$). Isso se deve ao fato dos *chillers* que absorvem os gases da exaustão possuírem maior Coeficiente de Performance (COP) e por consequência, uma maior capacidade de refrigeração.

Quanto maior a capacidade de refrigeração, maior será o rendimento (contribuição) do *chiller* por absorção frente a porção de energia ($\frac{R\$}{kWh}$) que foi aproveitada nos gases da exaustão do motor alternativo.

Tabela 31. Aplicação do indicador VEO em modelos de cogeração de energia funcionais

PE (kW)	η (MCI) 1ª Lei	R\$ Gn/h	R\$ GN/kWh	Fonte Chiller	(kW)	COP	RER	VEO
135	35%	60	0,1542		37	0,83	7,7%	0,0404
200	37%	82	0,1533	Água Quente	47	0,83	7,4%	0,0735
276	37%	113	0,1529		51	0,83	7,4%	0,0739
340	37%	142	0,1538		57	0,83	7,4%	0,0657
432	38%	175	0,1539		62	0,83	7,3%	0,0777
340	37%	142	0,1538	Vapor	56	0,81	7,2%	0,0649
432	38%	175	0,1539		60	0,81	7,1%	0,0769
135	35%	60	0,1542	Gás Exausto	61	1,36	12,6%	0,0624
200	37%	82	0,1533		76	1,36	12,1%	0,0946
276	37%	113	0,1529		84	1,36	12,1%	0,0951
340	37%	142	0,1538		93	1,36	12,2%	0,0870
432	38%	175	0,1539		101	1,36	11,9%	0,0986

Fonte: Autor

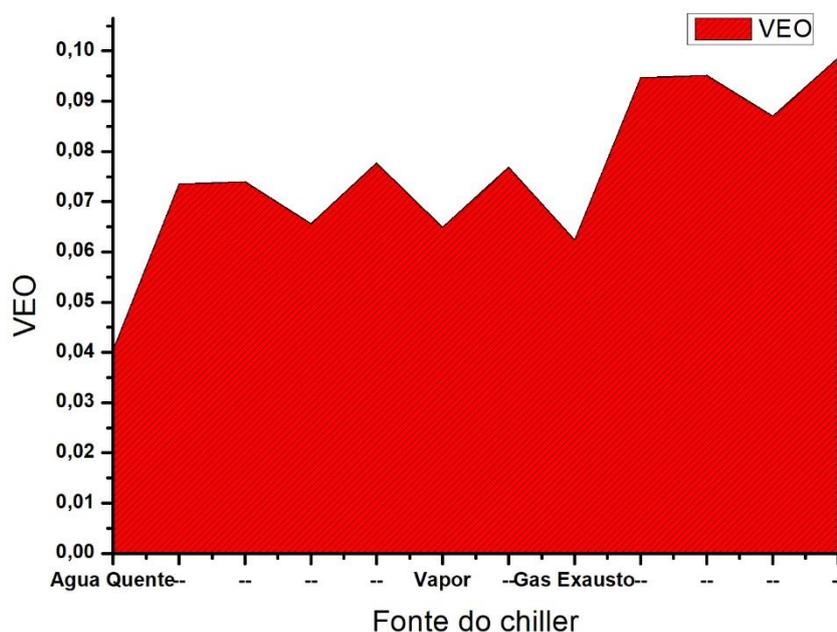


Figura 24. VEO para sistemas de cogeração de energia

Fonte: Autor

8.4. APLICAÇÃO NOS CENÁRIOS DO ESTUDO DE CASO

No cenário 1, aplicado o indicador AT, o resultado encontrado foi de 1,42, representando que o sistema do cenário 1 possui carga suficiente para o funcionamento entre o motor alternativo e o *chiller*, além da possibilidade de haver compensação da energia produzida, se houver necessidade.

Com o modelo emitindo 107,90 kg CO₂/h, o VEO encontrado foi de 0,0735, o que significa que, naquele momento, há a viabilidade econômica operacional para produzir a eletricidade. Desse modo, recomenda-se manter o sistema de cogeração em funcionamento.

No cenário 2, o indicador AT apresentou resultado igual a 1,21, o que significa que o sistema possui equilíbrio termodinâmico ideal (todo calor proveniente dos gases da exaustão está sendo utilizado para alimentar o *chiller* por absorção). A emissão de dióxido de carbono de 78,5 kg CO₂/h foi menor que a do cenário 1, em função da menor potência do motor alternativo.

O indicador de acompanhamento diário para geração ou não de eletricidade, o VEO, continuou positivo em 0,0404. Pelo fato de estar bem próximo a zero, o indicador sugere uma maior atenção do gestor, para que ele não perca oportunidades de compra da energia elétrica ao invés da geração.

Já no cenário 3, os resultados da aplicação do indicador AT e do VEO são iguais ao cenário 1. Existe uma pequena diferença no grau de emissão de CO₂ deste modelo, mas foi considerada irrelevante.

CONCLUSÃO

Esta dissertação descreveu um estudo técnico para implantação de sistemas de cogeração de energia baseado em motor alternativo a gás natural e *chiller* por absorção com foco de aplicação em supermercados. O estudo foi realizado atendendo às legislações de incentivo no Brasil e segue o mesmo direcionamento de países desenvolvidos, que utilizam há décadas a cogeração como alternativa de produção eficiente de energia.

Os resultados apresentados classificam os sistemas de cogeração que são viáveis no quesito técnico e economicamente favoráveis, através da análise dos indicadores de adequação termodinâmica (AT) e de viabilidade econômica operacional (VEO); além do grau de emissão de dióxido de carbono dos modelos (kg CO₂/h).

O estudo de caso em um supermercado atendeu aos requisitos legais de qualificação, o que permitiu o modelo se beneficiar dos benefícios e incentivos governamentais relacionados à cogeração qualificada, que resultou em uma redução substancial no gasto diário da energia elétrica do empreendimento.

Os resultados da análise de investimentos se mostraram favoráveis em todos os cenários. Para implantação do modelo no cenário 1, o VPL ficou positivo em R\$ 958.440,21, a TIR em 4,4% a.m. e *payback* descontado em 3,6 anos. No cenário 2, o VPL foi de R\$ 1.635.730,39, a TIR em 6,5% a.m. e o *payback* em 2,6 anos. No último cenário (3), o VPL foi de R\$ 997.686,22, a TIR em 4,2% a.m. e o *payback* em 3,7 anos. Em todos os cenários, o indicador VEO se apresentou positivo, indicando que há viabilidade econômica operacional para utilização. Vale destacar que o resultado próximo a zero sugere uma maior atenção do gestor para que ele não perca oportunidades de compra de eletricidade ao invés da geração.

O indicador ambiental mostrou que esses sistemas de cogeração no Brasil são poluentes, já que o grau de emissão de CO₂ desses modelos superam a emissão se o empreendimento comprasse eletricidade junto a concessionária de energia. Desse modo, os resultados vão de encontro aos apresentados por conhecidos pesquisadores na área, que recomendam os sistemas de cogeração como ambientalmente favoráveis.

REFERÊNCIAS

- ABREU FILHO, J. C. F., SOUZA, C. P., GONÇALVES, D. A., CURY, M. V. Q., 2007, “Finanças Corporativas”. 8ª Edição, FGV – Fundação Getúlio Vargas, Brasil.
- ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SODER, L., 2001, “Distributed generation: a definition”. *Electric Power Systems Research*, vol. 57, n. 3, pp. 195-204.
- ALEXIS, G. K., LIAKOS, P., 2013, “A case study of a cogeneration system for a hospital in Greece. Economic and environmental impacts”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, n. 2, pp. 488-496.
- ANGRISANI, G., ROSELLI, C., SASSO, M., 2012, “Distributed microtrigeneration systems”. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, pp. 502-521.
- ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIO COMBUSTÍVEIS. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/4955-producao-gas-natural-3dez2018>>. Acesso em 19 de Fevereiro de 2019.
- ARSALIS, A., 2012, “Modeling and simulation of a 100 kWe HT-PEMFC subsystem integrated with an absorption *chiller* subsystem”. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, n. 18, pp. 13484-13490.
- ARTECONI, A., BRANDONI, C., POLANARA, F., 2009, “Distributed generation and trigeneration: Energy saving opportunities in Italian supermarket sector”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, n. 8-9, pp. 1735-1743.
- BASSOLS, J., KUCKELKORN, B., LANGRECK, J., SCHNEIDER, R., VEELKEN, H., 2002, “Trigeneration in the food industry”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, pp. 595-602.
- BAXTER, V.D., 2005, “Summary of advanced supermarket R&D activities conducted under International Energy Agency (IEA)”, Annex 26, 8th IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, NV, USA.
- BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M., 2016, “Thermal Design & Optimization”. 1ª Edição, John Wiley & Sons, Estados Unidos.
- BIANCO, V., DE ROSA, M., SCARPA, F., TAGLIAFICO, L. A., 2016, “Implementation of a cogeneration plant for a food processing facility. A case study”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 500-512.
- BIDINI, G., DESIDERI, U., SAETTA, S., BOCCHINI, P. P., 1998, “Internal combustion engine combined heat and power plants: Case study of the University of Perugia power plant”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 18, n. 6, pp. 401-412.
- BP ENERGY OUTLOOK. The BP Energy Economics Outlook. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>>. Acesso em: 13 de Agosto de 2018.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 235 de 14 de Novembro de 2006. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acesso em: 23 de Março de 2017.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 23 de Março de 2017.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 674 de 11 de Agosto de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/024/resultado/ren2015674.pdf>>. Acesso em: 05 de Setembro de 2018.

BRUNO, J. C., MIGUEL, J., CASTELLS, F., 1999, “Modeling of ammonia absorption chillers integration in energy systems of process plants”. Applied Thermal Engineering, vol. 19, n. 12, pp. 1297-1328.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 687 de 24 de Novembro de 2015. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 23 de Março de 2017.

CAMPOS CELADOR, A., ERKOREKA, A., MARTIN ESCUDERO, K., SALA, J. M., 2011, “Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain”. Energy Policy, vol. 39, n. 6, pp. 3813-3821.

CARBON TRUST. Introducing combined heat and power. Group of Carbon Trust (2010). Disponível em: <https://www.carbontrust.com/media/19529/ctv044_introducing_combined_heat_and_power.pdf>. Acesso em 10 de Novembro de 2018.

CECCHINATO, L., CORRADI, M., MINETTO, S., 2010, “Energy performance of supermarket refrigeration and air conditioning integrated systems”. Applied Thermal Engineering, vol. 30, n. 14-15, pp.1946-1948.

CHEN, Q., 2014, “The exergy and energy level analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a small scale gas turbine at off design condition”. Applied Thermal Engineering, vol. 66, n. 1–2, pp. 590-602.

CHP BRASIL. Soluções em Geração Distribuída a Gás Natural. Página inicial. Disponível em: <<https://www.chpbrasil.com.br>>. Acesso em 12 de Outubro de 2018.

COLONNA, P., GABRIELLI, S., 2003, “Industrial trigeneration using ammonia–water absorption refrigeration systems (AAR)”. Applied Thermal Engineering, vol.23, n. 4, pp. 381-396.

ÇAKIR, U., ÇOMAKLI, K., YUKSEL, F., 2012, “The role of cogeneration systems in sustainability of Energy”. Energy Conversion and Management, vol. 63, pp. 196-202.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A., 2013, “Termodinâmica”. 7ª Edição, Mc Graw Hill, Brasil.

DÍAZ, P. R., BENITO, Y. R., PARISE, J. A. R., 2010, "Thermoeconomic assessment of a multiengine, multi-heat-pump CCHP (combined cooling, heating and power generation) system – A case study". *Energy*, vol. 35, n. 9, pp. 3540–3550.

EBRAHIMI, M., KESHAVARZ, A., 2012, "Climate impact on the prime mover size and design of a CCHP system for the residential building". *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 283-289.

EIA – Energy Information Administration. An introduction to spark spreads. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9911>>. Acesso em 28 de Agosto de 2018.

EIA – Energy Information Administration. Combined heat and power technology fills an important energy niche. Estados Unidos da América. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=8250>>. Acesso em 13 de Agosto de 2018.

ELETROFRIO. Manual de Refrigeração Comercial. Modelos (2018). Disponível em: <<https://www.eletrofrío.com.br>>. Acesso em 20 de Maio de 2018.

ELIAS, R. S., WAHAB, M. I. M., FANG, L., 2016, "The spark spread and clean spark spread option based valuation of a power plant with multiple turbines". *Energy Economics*, vol. 59, pp. 314-327.

FLÓREZ-ORREGO, D., SILVA, J.A.M., OLIVEIRA JR., S., 2014, "Renewable and non-renewable exergy cost and specific CO₂ emission of electricity generation: The Brazilian case", *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 619-629.

FONG, K., F., LEE, C. K., 2015, "Performance analysis of internal combustion engine primed trigeneration systems for use in high-rise office buildings in Hong Kong. *Applied Energy*, vol. 160, pp. 793-801.

GARCIA, R., 2013, "Combustíveis e Combustão Industrial". 2ª Edição, Interciência, Brasil.

GE, Y. T., TASSOU, S. A., SUAMIR, I. N., 2013, "Prediction and analysis of the seasonal performance of trigeneration and CO₂ refrigeration systems in supermarkets", *Applied Energy*, vol. 112, pp. 898-906.

GLOBO. PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NAS TERMELÉTRICAS BATE RECORDE EM 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2014/08/producao-de-energia-eletrica-nas-termeletricas-bate-recorde-neste-ano.html>>. Acesso em 14 de Janeiro de 2019.

GUIDO, W. H., LANSER, W., PETERSEN, S., ZIEGLER, F., 2018, "Performance of absorption *chillers* in field tests". *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 353-359.

HUICOCHEA A., RIVERA, W., GUTIÉRREZ-URETA, G., BRUNO, J. C., CORONAS, A., 2011, "Thermodynamic analysis of a trigeneration system consisting of a micro gas turbine and a double effect absorption *chiller*". *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, n. 16, pp. 3347-3353.

IBRAHIM, O., FARDOUN, F., YOUNES R., LOUAHLIA-GUALOUS H., 2013, "Energy status in Lebanon and electricity generation reform plan based on cost and pollution optimization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 255-278.

IBRAHIM, O., FARDOUN, F., YOUNES R., LOUAHLIA-GUALOUS H., 2014, "Review of water-heating systems: general selection approach based on energy and environmental aspects". *Building and Environment*, vol. 72, pp. 259-286.

INC. BETZ LABORATORIES, 1991, "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning". 9ª Edição, Betz Laboratories, Estados Unidos.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES (2006). Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>>. Acesso em 12 de Dezembro de 2018.

ISA, N. I., TAN, C. W., YATIM, A. H. M., 2017, "A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: A perspective from architecture and operating system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2236-2263.

JAYASEKARA, S., HALGAMUGE, S. K., 2014, "A combined effect absorption *chiller* for enhanced performance of combined cooling heating and power systems". *Applied Energy*, vol. 127, pp. 239-248.

KONSTANTAKOS, V., PILAVACHI, P. A., POLYZAKIS, A., THEOFYLAKTOS, C., 2012, "A decision support model for combined heat and power economic evaluation". *Applied Thermal Engineering*, vol. 42, pp. 129-135.

KORPER. Torres de Resfriamento. Modelos 2018. Disponível em: <<http://www.korper.com.br>>. Acesso em 01 de Maio de 2018.

KROOS, K. A., POTTER, M. C., 2016, "Termodinâmica para Engenheiros". 1ª Edição, Cengage Learning, Brasil.

LEAL, F., I., REGO, E. E., RIBEIRO, C. de O., 2019, "Natural gas regulation and policy in Brazil: Prospects for the Market expansion and Energy integration in Mercosul". *Energy Policy*, vol. 128, pp. 817-829.

MAIDMENT, G.G., PROSSER, G., 2000, "The use of CHP and absorption cooling in cold storage", *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, n. 12, pp. 1059-1073.

MAIDMENT, G.G., TOZER, R. M., 2002, "Combined cooling heat and power in supermarkets", *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, n. 6, pp. 653-665.

MAIDMENT, G. G., ZHAO, X., RIFFAT, S. B., 2001, "Combined cooling and heating using a gas engine in a supermarket". *Applied Energy*, vol. 68, n. 4, pp. 321-335.

MAIDMENT, G.G., ZHAO, X., RIFFAT, S. B., PROSSER, G., 1999, "Application of combined heat-and-power and absorption cooling in a supermarket", *Applied Energy*, vol. 63, n. 3, pp. 169-190.

MANZELA, A.A., HANRIOT, S. M., CABEZAS-GÓMEZ, L., SODRÉ, J. R., 2010, "Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system". *Applied Energy*, vol. 87, n. 4, pp. 1141-1148.

MARIMÓN, M. A., ARIAS, J., LUNDQVIST, P., BRUNO, J. C., CORONAS, A., 2011, "Integration of trigeneration in an indirect cascade refrigeration system in supermarkets". *Energy and Buildings*, vol. 43, n. 6, pp. 1427-1434.

MARTÍNEZ, B., TORRÓ, H., 2018, "Hedging spark spread risk with futures". *Energy Policy*, vol. 113, pp. 731-746.

MEDRANO, M., BROWER, J., McDONELL, V., MAUZEY, J., SAMUELSEN, S., 2008, "Integration of distributed generation systems into generic types of commercial buildings in California". *Energy and Buildings*, vol. 40, n. 4, pp. 537-548.

MOUSSAWI, H. A., FARDOUN, F., LOUAHLIA, H., 2017, "Selection based on differences between cogeneration and trigeneration in various prime mover technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 491-511.

MOUTINHO DOS SANTOS, E., ZAMALLOA, G. C., VILLANUEVA, L. D., FAGÁ, M. T. W., 2002, "Gás natural – Estratégias para uma Energia Nova no Brasil", Annablume, Brasil.

MUCCILLO, M., GIMELLI, A., 2014, "Experimental development, 1D CFD simulation and energetic analysis of a 15 kw micro-CHP unit based on reciprocating internal combustion engine". *Applied Thermal Engineering*, vol. 71, n. 2, pp. 760-770.

MURA, P. G., INNAMORATI, R., 2015, "Design of a new system of high-power efficiency conditioning cogeneration energy for a building of the University of Cagliari with fossil fuel plants". *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1111-1116.

OCHOA, A. A. V., DUTRA, J. C. C., HENRÍQUEZ, J. R. G., ROHATGI, J., 2014, "Energetic and Exergetic study of a 10RT absorption *chiller* integrated into a micro generation system". *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 545-553.

OFFICE OF NATURAL RESOURCES, Canada, 2003, "Commercial and Institutional Retrofits", Guide of Saving Energy Dollars in Stores, Supermarkets and Malls.

OLULEYE, G., JOBSON, M., SMITH, R., PERRY, S. J., 2016, "Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery". *Applied Energy*, vol. 161, pp. 627-646.

ORTIGA, J., BRUNO, J. C., CORONAS, A., 2013, "Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network". *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, n. 2, pp. 1536–1542.

PALOMINO, R. G., NEBRA, S. A., 2012, "The potential of natural gas use including cogeneration in large-sized industry and commercial sector in Peru", *Energy Policy*, vol. 50, pp. 192-206.

POPLI, S., RODGERS, P., EVELOY, V., 2013, "Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption *chillers* in the oil and gas industry". Applied Thermal Engineering, vol. 50, n. 1, pp. 918-931.

ROCHA, M. S., ANDREOS, R., SIMÕES-MOREIRA, J. R., 2012, "Performance tests of two small trigeneration pilot plants". Applied Thermal Engineering, vol. 41, pp. 84-91.

SANTANA, G. C. de S., 2003, "Análise Energética e Exergética em um Sistema de Cogeração para uma Empresa do Setor Terciário", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia (UFBA).

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa. Disponível em: <<http://monitoreletrico.seeg.eco.br>>. Acesso em 15 de Dezembro de 2018.

SILVA, D., 2016, "Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de uma Usina Termelétrica com Cogeração para suprir as demandas térmica e elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia (UFBA).

SUGIARTHA, N., TASSOU, S. A., CHAER, I., MARRIOTT, D., 2009, "Trigeneration in food retail an energetic, economic and environmental evaluation for a supermarket application". Applied Thermal Engineering, vol. 29, n. 13, pp. 2624-2632.

SUN, Z., 2008, "Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine". Energy and Buildings, vol. 40, n. 2, pp. 126-130.

SUN, Z.G., 2008, "Experimental investigation of integrated refrigeration system (IRS) with gas engine, compression *chiller* and absorption *chiller*". Energy, vol. 33, n. 3, pp. 431-436.

STURM, B., BUTCHER, M., WANG, Y., HUANG, Y., ROSKILLY, T., 2012, "The feasibility of the sustainable energy supply from bio wastes for a small scale brewery – A case study". Applied Thermal Engineering, vol. 39, pp. 45-52.

TEHRANI, S. S. M., SAFFAR-AVVAL, M., MANSOORI, Z., KALHORI, S. B., ABBASSI, A., DABIR, B., SHARIF, M., 2013, "Development of a CHP/DH system for the new town of Parand: An opportunity to mitigate global warming in Middle East". Applied Thermal Engineering, vol. 59, pp. 298-308.

WANG, J., WU, J., 2015, "Investigation of a mixed effect absorption *chiller* powered by jacket water and exhaust gas waste heat of internal combustion engine". International Journal of Refrigeration, vol. 50, pp. 193-206.

WANG, J., WU, J., WANG, H., 2015, "Experimental investigation of a dual-source powered absorption *chiller* based on gas engine waste heat and solar thermal Energy". Energy, vol. 88, pp. 680-689.

WORLD ENERGY. Catalog for Future Energy and Environment. Catálogos (2015). Disponível em: <<https://www.worldenergy.co.kr>>. Acesso em 7 de Julho de 2017.

ZHOU, Z., LIU, P., LI, Z., PISTIKOPOULOS, E. N., GEORGIADIS, M. C., 2013, "Impacts of equipment off-design characteristics on the optimal design and operation of combined cooling, heating and power systems". Computers & Chemical Engineering, vol. 48, pp. 40-47.

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Telefone: (71) 3283-9800

E-mail: pei@ufba.br

Home page: <http://www.pei.ufba.br>

