



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

**UNIVERSIDADE SALVADOR – UNIFACS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENERGIA**

FRANCISCO SOUZA ALMEIDA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE GÁS NATURAL PARA
APLICAÇÕES DE CLIMATIZAÇÃO NO SETOR COMERCIAL BRASILEIRO**

Salvador
2013

FRANCISCO SOUZA ALMEIDA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE GÁS NATURAL PARA
APLICAÇÕES DE CLIMATIZAÇÃO NO SETOR COMERCIAL BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, como parte das exigências do curso de Mestrado Profissional em Energia, para a obtenção de título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Britto
Guimarães.

Salvador
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador - UNIFACS)

Almeida, Francisco Souza

Análise técnico-econômica do uso de gás natural para aplicações de climatização no setor comercial brasileiro./ Francisco Souza Almeida. – Salvador, 2013.

131 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Salvador – UNIFACS. Mestrado em Regulação da Indústria de Energia, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Britto Guimarães.

1. Energia - Gás natural. I. Guimarães, Paulo Roberto Britto, orient. II. Título.

CDD: 621.042

TERMO DE APROVAÇÃO

FRANCISCO SOUZA ALMEIDA

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE GÁS NATURAL PARA APLICAÇÕES DE CLIMATIZAÇÃO NO SETOR COMERCIAL BRASILEIRO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Regulação da Indústria de Energia, Universidade Salvador – UNIFACS, pela seguinte banca examinadora:

Paulo Roberto Britto Guimarães – Orientador _____
Doutor em Engenharia Química pela University of Leeds
Universidade Salvador – UNIFACS

Kleber Freire da Silva _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP
Universidade Salvador – UNIFACS

Luiz Gustavo da Cruz Duarte _____
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina
- UFSC
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)

Salvador, 3 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, plena saúde, fé e perseverança para vencer os obstáculos.

Aos meus pais, Edvaldo Cardoso de Almeida (*in memoriam*) e Maria Conceição Reis Souza, pelo exemplo, orientação, dedicação e incentivo durante toda minha vida.

Ao meu irmão, Antônio Gabriel Souza Almeida, por ter aberto novos caminhos e ajudado sempre que solicitado.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Roberto Britto Guimarães, pela orientação e disponibilidade, e por ter feito deste trabalho uma experiência de crescimento pessoal e profissional.

Aos professores do mestrado, Luiz Pontes, Kleber Freire, Daniel Barbosa, Maria Olívia, Walber Carneiro, Paulo Rocha e José Ângelo por terem compartilhado seus conhecimentos, experiências e vivências.

Aos funcionários da UNIFACS pela solicitude, em especial a Fátima, pelas valiosas informações a respeito de prazos e procedimentos.

Aos colegas de curso, João Lins, Marlisson Santos, Fernando Mello, Francisco Lemos, Ricardo Nunes, Gabriel Arjones, Paulo Souza e Anne Calfa pelo companheirismo, sempre que necessário.

Aos colegas de trabalho que fizeram parte de minha vida durante este curso de mestrado, na Ford Motor Company do Brasil, Colégio Estadual Ana Bernardes e IFBA, pelo incentivo e vivências compartilhadas.

Aos sempre colegas do Laboratório de Energia e Gás Natural da UFBA, em especial ao seu coordenador, Prof. Ednildo Torres e sua assistente Vera Araújo, por manter as portas sempre abertas desta fonte de conhecimentos e oportunidades.

Enfim, sou imensamente grato a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

Desde o final do século passado que o Brasil como um todo, e mais especificamente a região nordeste deste país, vem passando por constantes crises no que se refere ao fornecimento de energia elétrica. O aumento crescente da demanda, especialmente no tocante ao setor comercial, aliado a uma possível exaustão do potencial hídrico nacional, bem como aos insuficientes investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica vêm a tornar esta situação cada vez mais grave. Para equacionar esta situação crítica entre oferta e demanda de eletricidade, estão sendo construídas, desde o início deste século, pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e principalmente termelétricas movidas a gás natural. Entretanto, seguindo o modelo atual de uso dos recursos energéticos, além da construção destas usinas geradoras, serão necessários investimentos concomitantes em transmissão e distribuição de energia elétrica, para que esta chegue até o consumidor final. Este trabalho almeja estudar a viabilidade técnico-econômica da inserção direta do gás natural sobre o consumidor final para aplicações de climatização localizadas no setor comercial, através de “chillers” que operam conforme ciclo de absorção, eliminando assim gastos adicionais em ampliação das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como as perdas energéticas decorrentes desses processos. O estudo de viabilidade, fundamentado na realidade tarifária de eletricidade e gás natural do estado da Bahia, vale-se de comparações técnicas e econômicas entre “chillers” de absorção à gás natural com seus equivalentes elétricos, que operam conforme ciclo de compressão, baseado em parâmetros como coeficiente de performance, eficiência exergética, custos operacionais e tempo de retorno ou “payback”. A conclusão obtida é que o uso de gás natural para aplicações de climatização em estabelecimentos comerciais é tecnicamente viável, entretanto, do ponto de vista econômico, reduções nas tarifas de gás natural da ordem de 2,5% são necessárias para que este insumo energético apresente a viabilidade econômica desejada em todas as faixas de estabelecimentos comerciais abordadas.

Palavras-chave: Ar Condicionado. Energia. Exergia. Gás Natural.

ABSTRACT

Since the end of the last century that Brazil as a whole, and more specifically the northeast region of this country, are passing by constant concerns regarding the electricity supply. The increasing demand, mainly located at commercial sector, combined with a possible exhaust of the hydric potential, associated with insufficient investments in generation, transmission and distribution of electrical power made this situation even more serious. To offset this critical situation between supply and demand of electricity, are being built, since the beginning of this century, small hydroelectric plants, wind generators and mainly thermoelectric power plants that uses natural gas as their energy input. However, according to the current model for the use of energy resources, the construction of these power plants will require simultaneous investments in order to increase the transmission and distribution lines of electrical energy, so that it reaches the final customer. This work aims to study the technical and economic feasibility for the direct application of natural gas to the climate control end customers, for applications located at the commercial sector, this insertion will be done by the use of "chillers" that operate according to an absorption cycle, eliminating additional expenses with electricity transmission and distribution lines expansion, as well as the energy losses resulting from these two processes. The feasibility study, based in the actual taxes of electricity and natural gas applied in the Bahia state, made technical and economic comparisons between natural gas "chillers" with their electrical equivalents, that works under vapour compression cycle, using parameters such as coefficient of performance, exergetic efficiency, operational costs and payback time. The conclusion is that the use of natural gas for climate control applications in commercial sector are technically feasible, however, from the economic point of view, reductions on the natural gas prices around 2,5% are needed to make feasible this kind of energy input for the commercial applications listed.

Keywords: Air Conditioning. Energy. Exergy. Natural Gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Déficit de energia elétrica para a região nordeste do Brasil(em MW).....	20
Figura 2.1 – Um dos primeiros climatizadores instalados nos EUA, ao lado de Willis Carrier	28
Figura 2.2 – Diagrama de Sankey mostrando as perdas geradas durante o processo atual de uso do gás natural como insumo energético para aplicações comerciais de climatização.....	31
Figura 2.3 – Diagrama de Sankey mostrando as perdas perdas durante o processo proposto de uso do gás natural como insumo energético para aplicações comerciais de climatização.....	33
Figura 2.4 – Esquema de operação para um “chiller” tipo GEC.....	38
Figura 2.5 – Sistema de climatização por expansão direta	44
Figura 2.6 – Equipamentos de expansão direta: 1-ACJ, 2-“split-system” e 3-“self-contained”	45
Figura 2.7 – Sistema de climatização por expansão indireta	46
Figura 2.8 – Equipamento resfriador de líquido ou “chiller”	47
Figura 2.9 – Esquema do ciclo de compressão a vapor.....	48
Figura 2.10 – “chillers” elétricos utilizados no mercado.....	51
Figura 2.11 – Compressores alternativos: (a)Aberto, (b)Semi-hermético e (c)Hermético.....	52
Figura 2.12 – Ilustração de um compressor “scroll” em corte.....	53
Figura 2.13 – Ilustração de um compressor parafuso em corte	55
Figura 2.14 – Ilustração de um compressor centrífugo em corte	56
Figura 2.15 – Ciclo de absorção por simples efeito.....	58
Figura 2.16 – Ciclo de absorção por duplo efeito	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 – Expansão comercial na região Nordeste do Brasil	18
Gráfico 1.2 – Déficit de energia elétrica para a região Nordeste do Brasil	19
Gráfico 1.3 – Estratificação do consumo de energia elétrica da região nordeste por setor	21
Gráfico 1.4 – Estratificação do consumo de energia elétrica de estabelecimentos comerciais	22
Gráfico 1.5 – Estagnação do potencial hidrelétrico Brasileiro, em MW	24
Gráfico 1.6 – Crescimento das reservas de gás natural, em milhões de metros cúbicos	25
Gráfico 3.1 – Custos de um investimento.....	75
Gráfico 3.2 – Comparação entre dois investimentos.....	76
Gráfico 4.1 – Comparação energética.....	81
Gráfico 4.2 – Comparação exergética.....	84
Gráfico 4.3 – Comparação econômica baseada nos custos operacionais	86
Gráfico 4.4 – Custos totais para os “chillers” de 50TR.....	88
Gráfico 4.5 – Custos totais para os “chillers” de 100TR.....	91
Gráfico 4.6 – Custos totais para os “chillers” de 250TR.....	93
Gráfico 4.7 – Custos totais para os “chillers” de 500TR.....	95
Gráfico 4.8 – Tarifas de gás natural para o setor de cogeração.....	100
Gráfico 4.9 – Evolução dos preços de eletricidade e gás natural nos últimos 10 anos	104
Gráfico 4.10 – Tarifas do gás natural para diversos países	105
Gráfico 5.1 – Estratificação das tarifas médias de gás natural empregadas no Brasil	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eficiências existentes na cadeia atual de geração termoelétrica de eletricidade	32
Tabela 2.2 - Características operacionais para os “chillers” elétricos	57
Tabela 2.3 - Características operacionais para os “chillers” movidos a gás natural.	62
Tabela 3.1 - Composição do gás natural comercializado no estado da Bahia .	68
Tabela 3.2 - Fator β para o gás natural comercializado no estado da Bahia ...	68
Tabela 3.3 - Preços de energia elétrica para o setor comercial(ICMS=27%,PIS/COFINS=4,4%)	70
Tabela 3.4 - Comparação entre os custos da energia produzida conforme a natureza da usina.....	71
Tabela 3.5 - Preços do gás natural para o setor comercial do estado da Bahia	72
Tabela 3.6 - Consumo de “chillers” a gás natural em metros cúbicos por mês	73
Tabela 4.1 - Coeficiente de performance global para os “chillers” utilizados ...	80
Tabela 4.2 - COP global proposto para aplicações de 50TR	82
Tabela 4.3 - Eficiência exergética global para os “chillers” utilizados.....	83
Tabela 4.4 - Custos operacionais para os “chillers” utilizados.....	85
Tabela 4.5 - Custos relacionados aos equipamentos de 50TR	88
Tabela 4.6 - Valores financeiros ideais para viabilizar o “chiller” de gás natural com 50TR.....	90
Tabela 4.7 - Custos relacionados aos equipamentos de 100TR	90
Tabela 4.8 - Custos relacionados aos equipamentos de 250TR	92
Tabela 4.9 - Valores financeiros ideais para viabilizar o “chiller” de gás natural com 250TR.....	94
Tabela 4.10 - Custos relacionados aos equipamentos de 500TR	94
Tabela 4.11 - Comparação entre os tempos de retorno obtidos com o valor máximo de 120 meses	95
Tabela 4.12 - Comparação das tarifas para o segmento COMERCIAL com as tarifas máximas	97
Tabela 4.13 - Tarifas de gás natural para o setor de cogeração	98
Tabela 4.14 - Comparação das tarifas para o segmento de COGERAÇÃO com as tarifas máximas	98
Tabela 4.15 - Tarifas PROPOSTAS de gás natural para viabilizar aplicações comerciais	101
Tabela 4.16 - Tempo de retorno aplicando-se a estrutura tarifária proposta..	102

Tabela 4.17 - Valores tarifários do gás natural para estados e regiões do Brasil
..... 103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abegás	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Natural
ABL	Área Bruta Locável
Abrasce	Associação Brasileira de Shopping Centers
Abrava	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Aquecimento e Ventilação.
ACJ	Ar Condicionado de Janela
Agerba	Agência Estadual de Regulação de Serviços Públicos de Energia, Transportes e Comunicação do Estado da Bahia
AHRI	Air Conditioning, Heating and Refrigeration Institute
ALgás	Companhia de Gás Natural do Estado de Alagoas
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ARI	Air Conditioning and Refrigeration Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
Bahiagás	Companhia de Gás Natural do Estado da Bahia
BEN	Balanço Energético Nacional
bep	Barril Equivalente de Petróleo
BR-ES	Petrobrás Distribuidora de Gás Natural do Espírito Santo
CEG	Companhia de Gás Natural do Estado do Rio de Janeiro
CEgás	Companhia de Gás Natural do Estado do Ceará
Coelba	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
Comgás	Companhia de Gás Natural do Estado de São Paulo
Compagás	Companhia de Gás Natural do Estado do Paraná
COP	Coeficiente de Performance
Copegás	Companhia de Gás Natural do Estado de Pernambuco
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas

Gasmig	Companhia de Gás Natural do Estado de Minas Gerais
GEC	Gas Engine Chiller
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDV	Instituto para Desenvolvimento do Varejo
IEA	International Energy Agency
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPLV	Integrated Part-Load Value
LiBr	Brometo de Lítio
MME	Ministério das Minas e Energia
MSgás	Companhia de Gás Natural do Estado de Mato Grosso do Sul
ONS	Operador Nacional do Sistema elétrico
PBgás	Companhia de Gás Natural do Estado da Paraíba
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDE	Plano Decenal de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
Potigás	Companhia de Gás Natural do Estado do Rio Grande do Norte
Procel	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
SCgás	Companhia de Gás Natural do Estado de Santa Catarina
Sergás	Companhia de Gás Natural do Estado de Sergipe
SIN	Sistema Interligado Nacional
SRF	Secretaria da Receita Federal
Sulgás	Companhia de Gás Natural do Estado do Rio Grande do Sul
TR	Tonelada de Refrigeração, o equivalente a 12000BTU/h
UTES	Usinas Termelétricas
WWF	World Wildlife Fund

LISTA DE SÍMBOLOS

i	Irreversibilidade ou perda
e	Energia
η	Eficiência do processo ou cadeia energética
Ex	Exergia
m	Massa
h	Entalpia específica
s	Entropia específica
T	Temperatura
N _c	Número de átomos de carbono
H/C	Relação entre o número de átomos de hidrogênio e carbono
Q	Calor trocado
W	Consumo de energia elétrica
\$	Custos e preços
t	Tempo
FP	Fora do horário de ponta
NP	Normal do horário de ponta

Letras Gregas

β	Relação entre PCI e a exergia de combustão
Ψ	Eficiência exergética

Sobrescritos

f	Física
q	Química
el	Elétrica
p	Potencial
c	Cinética
\dot{m}	Ponto em cima das letras refere-se a taxa ou fluxo

Subscrito

te	Referente à usina termelétrica
----	--------------------------------

tr	Referente à transmissão de energia elétrica
di	Referente à distribuição de energia elétrica
ch	Referente ao “chiller”
g	Global
s	Referente à saída
e	Referente à entrada
L	Referente ao evaporador
el	Elétrico
água	Referente ao fluxo de água
ge	Referente ao gerador de calor
comb	Referente ao fluxo de combustível
b	Referente às bombas
c	Referente ao compressor
FP	Fora do horário de ponta
NP	Normal do horário de ponta
GN	Referente ao gás natural
op	Operacionais
tot	Totais
t=0	Iniciais ou de aquisição dos equipamentos
ret	De retorno
max	Máxima viável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO.....	25
1.1.1 Objetivo geral	25
1.1.2 Objetivo específico	26
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 HISTÓRICO	27
2.2 EXERGIA	40
2.3 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO PARA FINS COMERCIAIS	43
2.3.1 “Chillers” elétricos	47
2.3.2 “Chillers” movidos a gás natural	57
3 METODOLOGIA	63
3.1 INTRODUÇÃO	63
3.2 COMPARAÇÃO TÉCNICA.....	64
3.2.1 Comparação energética	65
3.2.2 Comparação exergética	66
3.3 COMPARAÇÃO ECONÔMICA	69
3.3.1 Comparação com base nos custos operacionais	69
3.3.2 Estudo de viabilidade econômica	73
4 SIMULAÇÕES, COMPARAÇÕES E ANÁLISES	79
4.1 INTRODUÇÃO	79
4.2 SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES TÉCNICAS	79
4.2.1 Comparações energéticas	80
4.2.2 Comparações exergéticas	83
4.3 SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES ECONÔMICAS.....	85
4.3.1 Comparações baseadas nos custos operacionais	85
4.3.2 Comparações e estudos de viabilidade econômica	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – Simulações técnico-econômicas	123

ANEXO A – Tarifas e preços finais de energia elétrica da Coelba - horosazonal verde A3A (30 a 44kV).....	127
ANEXO B – Tarifas de gás natural Bahiagás	128
ANEXO C – Instrução normativa número 162 da Receita Federal	131

1 INTRODUÇÃO

O ser humano mantém uma relação com o meio ambiente baseada em circunstâncias. Quando o clima é quente, o homem repousa na sombra; nas épocas frias, ele procura abrigo nos espaços reclusos para se proteger do vento e da chuva. Enquanto o homem tem sido capaz, desde a época pré-histórica, de aumentar a temperatura utilizando o fogo, apenas recentemente ele se tornou capaz de diminuir a temperatura do ar ambiente e assim, se livrar das agruras dos dias quentes. A descoberta do ciclo de refrigeração e o desenvolvimento da máquina frigorífica, segundo Almeida, Torres e Santos (2003), abriram o caminho para o uso prático do ar condicionado em aplicações residenciais, industriais e comerciais. Em um ciclo convencional de refrigeração e ar condicionado, o fluido refrigerante é comprimido em um compressor e liquefeito no condensador. O fluido sofre então um estrangulamento na válvula de expansão. Obtém-se assim a baixa temperatura no evaporador, onde ocorre o processo de resfriamento.

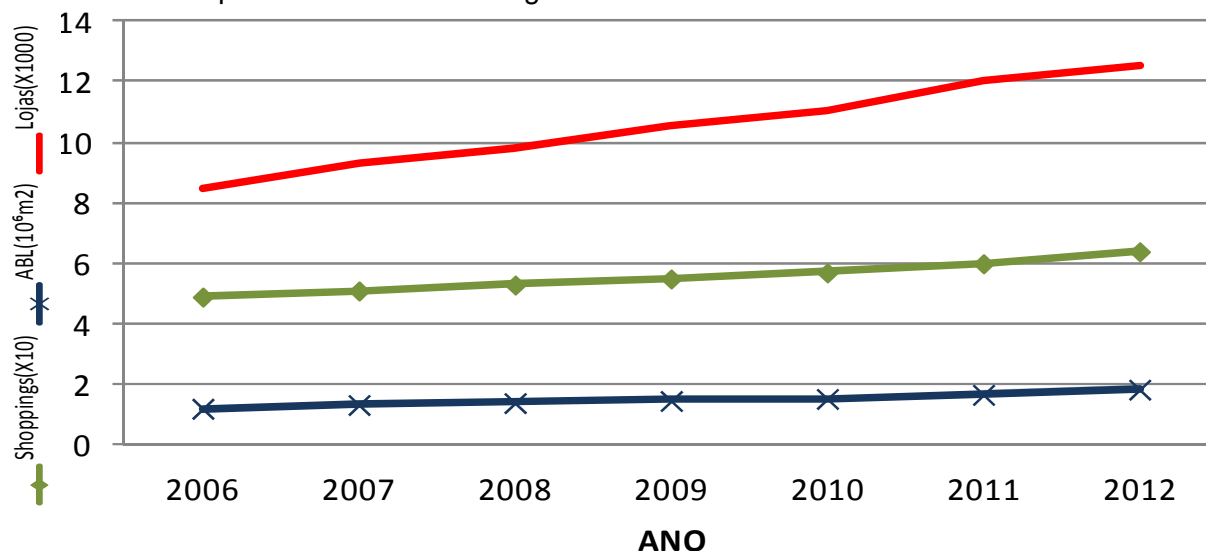
A indústria de refrigeração e ar condicionado está ficando cada vez mais extensa e variada. Até meados do século XX, segundo Stoecker (2009), o uso primordial da refrigeração era produção de gelo. Hoje, devido ao advento do ar condicionado, as pessoas vivem mais confortáveis, saudáveis e muitas tarefas realizadas em todos os setores da sociedade contemporânea (residencial, industrial, comercial e serviços) são conduzidas de forma mais eficaz.

Dentro desse contexto, o setor comercial apresenta uma profunda dependência dos sistemas de ar condicionado, pois o conforto térmico é uma das condições primordiais para garantir a competitividade de um estabelecimento perante os demais do mesmo segmento.

Nos últimos anos, mais precisamente desde o ano de 2006, o setor comercial varejista da região Nordeste do Brasil apresenta-se em franca expansão. Dados oriundos da Abrasce (2013), mostrados no Gráfico 1.1,

registram um aumento de 22% na quantidade de shopping centers nesta região, bem como um simultâneo aumento de 37% na área bruta locável (ABL) disponibilizada por estes estabelecimentos.

Gráfico 1.1 – Expansão comercial na região Nordeste do Brasil



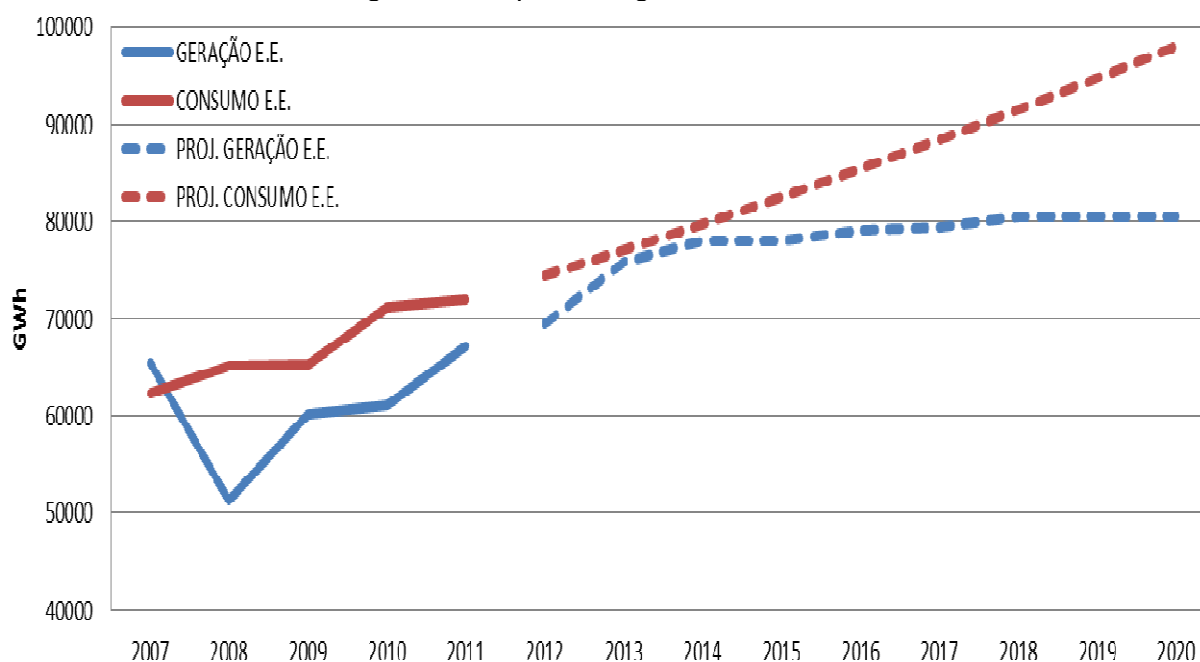
Fonte: Abrasce (2013).

Este aumento torna imprescindível um acompanhamento de toda infraestrutura necessária para seu funcionamento. Esta é composta basicamente de todo arcabouço logístico para transporte de mercadorias e clientes e também do suprimento energético para que esses estabelecimentos provenham iluminação e conforto térmico aos seus clientes. No tocante ao conforto térmico, pode-se verificar que a quase totalidade desses estabelecimentos utilizam como insumo energético única e exclusivamente a energia elétrica, por meio de equipamentos resfriadores de líquido (“chillers”) que operam conforme o ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

Porém, uma análise mais elaborada das informações pertinentes à geração e consumo de energia elétrica na região Nordeste do Brasil fornece uma perspectiva sombria, pois o consumo de energia elétrica, que até o ano de 2007 apresentava-se menor que a capacidade instalada de geração regional, depois de 2008 apresenta-se maior que a capacidade de geração desta região, conforme o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (MME, 2012a). Ao verificar-se as perspectivas estabelecidas para este cenário, tomando-se como base os

dados referentes às projeções de consumo conforme cenários intermediários (nem otimistas nem pessimistas) fornecidos pelo PNE2030 (MME, 2007), que consistem em um incremento médio anual por parte da demanda de 3,5%, bem como as informações pertinentes à geração de energia elétrica na região Nordeste provisionadas pelo PDEE2021 (MME, 2013), onde constam projetos já licitados e em construção de usinas geradoras a base de gás natural, biomassa, PCHs e fontes alternativas no biênio 2012-2013 e projetos a serem licitados e construídos no intervalo de 2016 até 2018, verifica-se que a tendência é que a região Nordeste do Brasil não conseguirá superar o déficit de energia elétrica por toda a próxima década, principalmente porquê após 2018 não há investimentos em geração de energia elétrica previstos para esta região do país. Os dados obtidos podem ser melhor visualizados no Gráfico 1.2.

Gráfico 1.2 – Déficit de energia elétrica para a região Nordeste do Brasil



Fonte: MME (2007), MME (2012a) e MME(2013).

Uma confirmação deste desequilíbrio crescente entre oferta e demanda de energia elétrica relativa à região Nordeste do Brasil também pode ser facilmente vista por meio da Figura 1.1, onde constam os intercâmbios entre todos os subsistemas da rede elétrica ligadas ao sistema interligado nacional (SIN) durante o ano de 2011. Nesta figura as setas indicam os fluxos médios de energia elétrica durante o período citado.

Figura 1.1 – Déficit de energia elétrica para a região nordeste do Brasil(em MW)

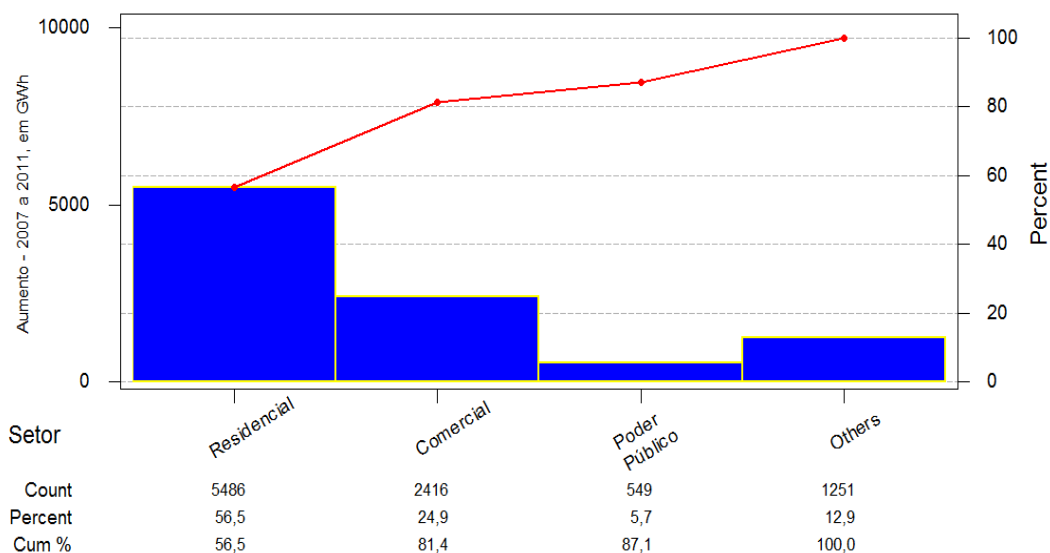


Fonte: MME (2012a).

Os dados fornecidos pelo Anuário Estatístico de Energia Elétrica (MME, 2012a) também dizem muito a respeito dos setores que mais afetaram o surgimento e manutenção deste déficit no período 2008-2011. Estas informações, compiladas através do Gráfico 1.3, mostram os principais vetores do déficit energético da região Nordeste do Brasil. Pode-se claramente verificar que aproximadamente 25% do crescimento da demanda e conseqüentemente do desequilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica estão situados exatamente no setor comercial. Além disso, as previsões estabelecidas pelo PNE2030 (MME, 2007) atribuem ao setor comercial uma taxa de crescimento igual a 4,0%, ante 2,8% do setor industrial, significando uma crescente

participação deste setor para os anos vindouros. Como consequência, este setor de acordo com Correia (2010), possui extrema importância para qualquer estudo que almeje uma melhoria significativa nesta situação.

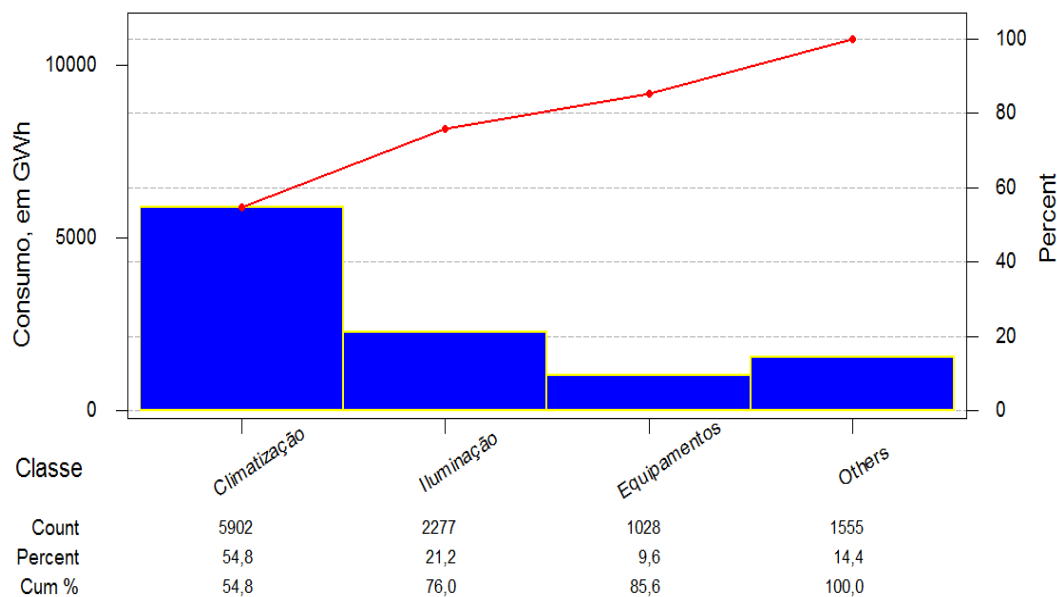
Gráfico 1.3 – Estratificação do consumo de energia elétrica da região nordeste por setor



Fonte: MME, (2012a).

O setor comercial, especialmente no tocante ao consumo de energia elétrica, apresenta algumas particularidades que o diferenciam com relação aos demais setores da economia. Um levantamento feito com base nas informações coletadas pelo IDV (2013) provê uma estratificação detalhada do consumo energético deste setor. O Gráfico 1.4 mostra que, neste setor, o fator que norteia o consumo energético é o uso final para climatização dos recintos dos estabelecimentos comerciais.

Gráfico 1.4 – Estratificação do consumo de energia elétrica de estabelecimentos comerciais



Fonte: IDV, (2013).

Diante do exposto, pode ser claramente verificado que, reduzindo o consumo de eletricidade por parte dos equipamentos de climatização dos estabelecimentos comerciais da região Nordeste, reduzir-se-á também de forma drástica o consumo deste setor e conseqüentemente o déficit de energia elétrica que está se projetando em um horizonte próximo. De uma forma geral, a redução do déficit energético sem produzir impactos que afetem diretamente a sociedade pode ser provida de três formas:

- a) Racionalização do uso de energia elétrica: Através da otimização no uso de aparelhos e equipamentos e/ou do aumento da eficiência energética dos mesmos (SANTOS, 2006);
- b) Aumento na capacidade de geração de energia elétrica da região: Esta alternativa outrora fácil e eficaz agora apresenta difícil realização, devido à demora nos processos licitatórios e de licenciamento ambiental, por conta dos impactos que serão produzidos em tais empreendimentos, independente do insumo energético ou natureza da usina geradora (CORREIA, 2010);

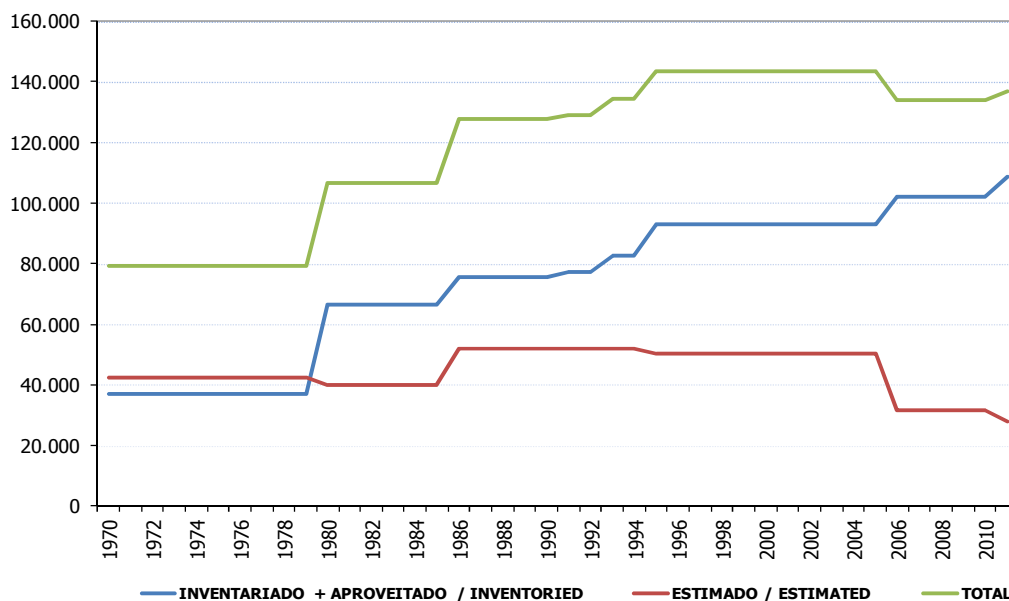
- c) Diversificação da matriz de insumos energéticos utilizados para acionamento dos equipamentos de climatização: Neste caso, seria feita uma modificação da natureza dos equipamentos, que passariam a utilizar outros insumos energéticos diferentes da energia elétrica.

Fazendo uma análise superficial dessas alternativas, pode-se ver que, para o primeiro caso, o Procel vem trabalhando há mais de duas décadas provendo a eficiência energética não apenas no tocante à climatização no setor comercial, mas de uma forma extremamente abrangente a todos os equipamentos de todos os setores de nossa economia. No segundo caso, conforme citado acima, não há viabilidade ou tempo hábil para a construção de novos empreendimentos desta natureza na região Nordeste em magnitude que permita mudar este quadro de desequilíbrio entre oferta e demanda, além do que isto demandaria não só uma ampliação na capacidade de geração, mas também nas capacidades de transmissão e distribuição de energia elétrica ligadas ao SIN. A terceira alternativa, de diversificação na matriz de insumos energéticos é algo praticamente inédito em âmbito nacional. Esta alternativa, conforme Grippi (2009), apresenta o uso de novos, porém disponíveis insumos energéticos na matriz energética para substituir a energia elétrica em determinadas aplicações. Esta substituição não traria nenhum ônus à estrutura de geração ou distribuição do insumo, pois preconiza o uso de uma rede de transporte e distribuição já existente. Para o caso específico das aplicações de climatização existentes no setor comercial, estão em uso corrente por parte de nações da Europa os equipamentos movidos a gás natural, seja por meio de ciclo de absorção, conforme mencionado por Monteiro e Silva (2010), ou valendo-se de um ciclo convencional de compressão a vapor, porém acionados por um motor de combustão interna movido a gás natural (GEC).

A questão energética, principalmente com relação à energia elétrica é algo que causa preocupação em todos os setores da sociedade, desde o final do século passado, quando a predominantemente hidrelétrica produção de energia sofreu uma estagnação em seu potencial, mostrada no Gráfico 1.5 extraído do BEN2011 (MME, 2012b), que aliado à redução do nível dos reservatórios dessas usinas, promoveu, de acordo com Goldemberg e Prado

(2003) uma relação crítica entre oferta e demanda de eletricidade no Brasil, fazendo com que os riscos de “apagões” fossem constantes.

Gráfico 1.5 – Estagnação do potencial hidrelétrico Brasileiro, em MW

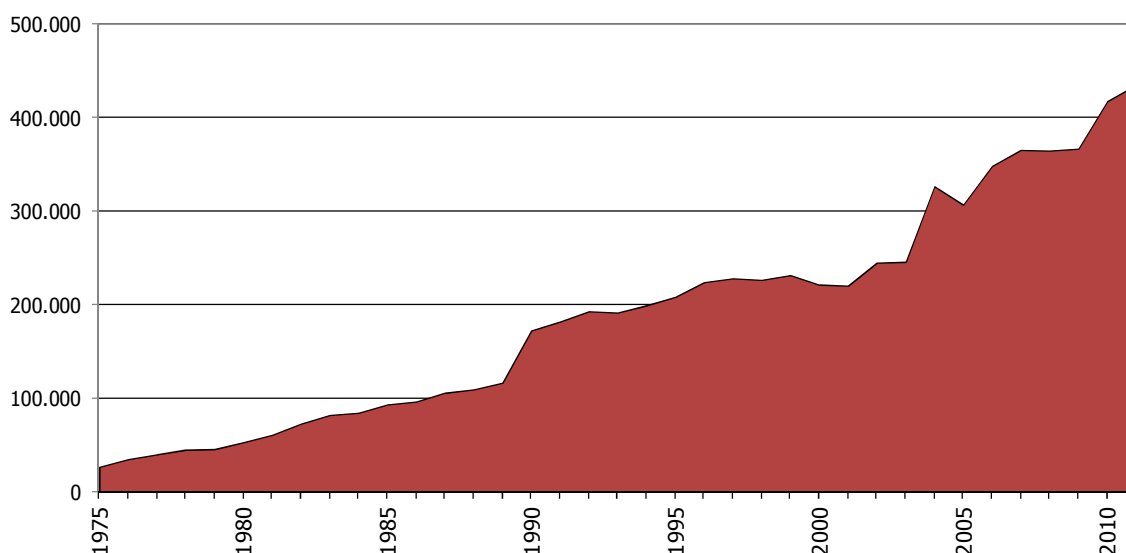


Fonte: MME (2012b).

Como parte da solução do problema existente entre oferta e demanda de energia elétrica, no começo da década passada iniciou-se a construção de usinas termoelétricas (UTES), nas quais o gás natural apresentou-se como melhor alternativa de insumo energético principalmente pelo fato de possuir menor emissão de poluentes em comparação com os demais combustíveis fósseis(carvão, óleo, diesel, etc...), e também por permitir ajustes refinados de capacidade nas usinas. Por outro lado, a construção de usinas termoelétricas movidas a gás natural não resolve completamente o problema energético, pois requer a concomitante ampliação das linhas de transmissão e distribuição de eletricidade, além de envolver custos de ociosidade como forma de atrair empreendedores o que encarece as tarifas de energia elétrica. Uma forma de dispensar todos estes investimentos de construção de usinas e ampliação de linhas seria inserir o gás natural diretamente no equipamento consumidor, como no caso da climatização para o setor comercial. Porém, seja por meio de termoelétricas ou por meio da inserção deste apenas no final da cadeia, também existe a preocupação quanto à garantia de fornecimento do gás natural de forma a suprir a demanda crescente deste insumo energético.

Informações oriundas do BEN2011 (MME, 2012b), que constam no Gráfico 1.6, mostram que, ao contrário do potencial hidroelétrico, as reservas provadas de gás natural apresentam crescimento constante, provendo perspectivas positivas quanto a sua utilização.

Gráfico 1.6 – Crescimento das reservas de gás natural, em milhões de metros cúbicos



Fonte: MME (2012b).

Além disso, recentes descobertas de reservas localizadas nas bacias de Campos, Santos e Sergipe/Alagoas, aliadas ao imenso potencial no que se refere ao gás de folhelho ou “shale gas”, cujas reservas localizadas no vale do Rio São Francisco têm capacidade aproximada é de 6,3 trilhões de m³ (IEA, 2013), proverão a garantia de fornecimento necessária ao Brasil nas próximas décadas. Além disso, são reportadas reservas superiores a 550 bilhões de m³ deste tipo de gás nas Bacias do Recôncavo e de Tucano.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho visa não apenas fazer uma comparação entre climatizadores elétricos e a gás natural para aplicações comerciais, mas estudar a possibilidade do uso de “chillers” a gás natural para tais aplicações,

propondo alternativas técnicas e tarifárias de forma a se atingir uma condição de viabilidade. Para tal, foi realizado um estudo de caso com base no estado do Nordeste que mais consome eletricidade e gás natural, que é a Bahia.

1.1.2 Objetivo específico

- Apresentar novas e viáveis alternativas ao consumo de energia elétrica para aplicações de climatização existentes no setor comercial.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido nos capítulos introdução, revisão bibliográfica, metodologia, simulações comparações e análises, e considerações finais.

O capítulo 1, relativo à introdução mostra os aspectos que motivaram a realização do trabalho, bem como seus objetivos.

No capítulo 2 consta toda a revisão bibliográfica, formada pelo arcabouço teórico que fundamenta o trabalho e pelos estudos já realizados sobre o tema em questão.

O capítulo 3 contém a metodologia que seguida durante as simulações realizadas neste trabalho, assim como as normas e fatores técnico-econômicos utilizados.

Dentro do capítulo 4 estão os resultados obtidos das simulações, que são comparações entre os equipamentos (“chillers”) acionados por meio de eletricidade e gás natural, as análises oriundas destas comparações e propostas objetivando a viabilidade do gás natural para aplicações comerciais de climatização.

No capítulo 5, referente às considerações finais, está uma síntese dos resultados alcançados e sugestões para trabalhos futuros envolvendo o tema em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

A Sackett-Wilhelms Lithography and Publishing, empresa do ramo gráfico localizada em Nova York (EUA), necessitava de uma solução urgente para os problemas causados pelo calor e umidade. Chamado para solucionar o problema, o jovem engenheiro americano Willis Carrier, de 25 anos, criou uma estrutura mecânica para condicionar o ar, inventando assim, em 1902 de acordo com Trott e Welsh (2008), o ar condicionado. Acreditando que poderia acabar com a umidade do ar da fábrica resfriando o ar, a estrutura de Carrier fazia circular o ar por dutos gelados artificialmente. Um processo complexo para a época, que oferecia controle de temperatura e umidade.

Logo depois o ar condicionado começou a atingir outras indústrias. Em 1914, foi instalado o primeiro ar condicionado em uma residência, que foi uma mansão do estado americano de Minneapolis. Em seguida foi instalado o primeiro aparelho de ar condicionado em um hospital, o Allegheny General Hospital, situado em Pittsburgh, lá, conforme Rienzo (2007), este equipamento resfriava um berçário de partos prematuros, auxiliando na redução da mortalidade causada pela desidratação.

Em meados de 1922, o ar condicionado ajudou a indústria cinematográfica, pois antes, o público presente nas salas de cinema diminuía muito nas temporadas de calor excessivo. De acordo com Rienzo (2007), em 1928 a Câmara de Deputados dos EUA recebeu os aparelhos de ar condicionado, em 1929, foi a vez do Senado Americano, e em 1930 os escritórios da Casa Branca, como pode ser visto na Figura 2.1, ao lado de Willis Carrier. No mesmo ano os trens da ferrovia B&O foram os primeiros veículos de passageiros a obterem ar condicionado instalados em suas dependências.

Na década de 30 do século passado, segundo Stoecker (2009), Carrier desenvolveu um sistema que possibilitava a distribuição do ar em alta velocidade, utilizando para isso dutos de ar, viabilizando a instalação de ar condicionado em arranha-céus. Após a segunda guerra mundial, foi difundido o

uso de equipamentos de ar condicionado para aplicações comerciais, o que aliado ao crescente número de fabricantes, contribuiu para o aumento exponencial do seu uso neste segmento.

Figura 2.1 – Um dos primeiros climatizadores instalados nos EUA, ao lado de Willis Carrier



Fonte: Rienzo (2007).

Os sistemas de ar condicionado por absorção passaram por muitos altos e baixos ao longo dos anos. Foram predecessores dos sistemas de compressão de vapor no Século XIX e os sistemas água-amônia tinham grande aplicação em refrigeradores domésticos e grandes instalações industriais, como indústrias químicas e de processos. O sistema LiBr-água foi comercializado nos anos 1940 e 1950 como resfriadores de água para ar condicionado de grandes edifícios. Estes eram energizados por vapor ou água quente gerados em caldeiras a óleo e gás natural. Nos anos 1970 a substituição de combustão direta de óleo e gás natural afetou a aplicação de unidades de absorção, mas ao mesmo tempo abriu outras oportunidades, como a utilização do calor derivado de coletores solares para energizar essas unidades. Também em função do aumento crescente do custo da energia, o calor de baixo nível de temperatura (na faixa de 90°C a 110°C), que era anteriormente rejeitado para a atmosfera em instalações químicas e de processo, conforme Villa, Dutra e Guerrero (2012), é agora frequentemente

usado para operar sistemas de absorção que fornece refrigeração necessária em algum outro ponto da fábrica.

Apesar de contemporâneos, os sistemas de absorção, no mercado brasileiro, foram preteridos em prol dos sistemas de compressão, devido em grande parte aos seus custos iniciais (aquisição e instalação) serem significativamente superiores aos dos sistemas de compressão, além da abundante oferta de energia elétrica no Brasil, uma vez que a construção de grandes empreendimentos de natureza hidroelétrica realizados nas décadas de 1970 e 1980 fez com que a energia elétrica viesse a ser abundante e de custo relativamente baixo (ABREU; MARTINEZ, 2003). Este cenário passou a mudar no fim do século passado, com a redução drástica nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas e consequente aumento nos custos da eletricidade (Grippi, 2009), fazendo surgir algumas opções para o uso deste insumo em aplicações de climatização, tais como os sistemas de climatização que operam conforme ciclo de absorção, ou por queima direta ou por meio de cogeração, onde, de acordo com Monteiro e Silva (2010), um gerador de vapor ou caldeira fornece vapor que simultaneamente acionam uma turbina para gerar energia e um resfriador de líquido (“chiller”) para prover conforto térmico nos ambientes desejados.

A outra opção que foi adotada pelo governo, para atender a todos os setores dependentes da energia elétrica, segundo Goldemberg e Prado (2003), consistiu na implementação do Programa de Geração Emergencial, em 1999, do Programa Prioritário das Térmicas (UTES) e do Leilão de Capacidade, em 2000. Com isso, iniciou-se a construção de usinas termoelétricas com o objetivo de suprir o déficit de energia elétrica devido ao baixo nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas. Porém, a implementação desses empreendimentos produziu um efeito contrário, que foi o encarecimento das tarifas de energia elétrica por todo o Brasil.

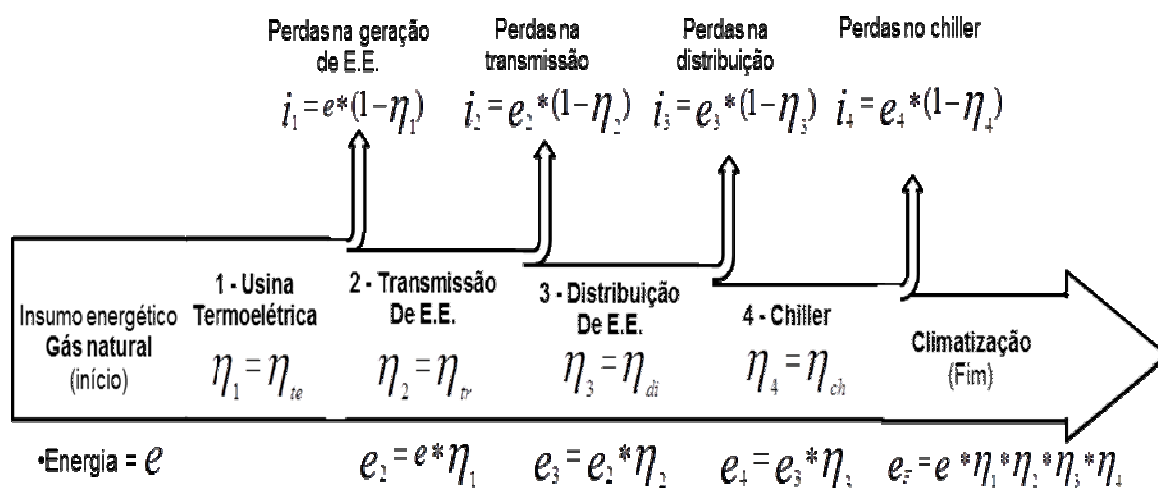
Na região Nordeste do Brasil, assim como em todo mercado nacional, o fim dos anos 1990 representou um marco no tocante a inserção dos sistemas de climatização por absorção no mercado comercial, no qual de acordo com Santos (2005), o shopping Iguatemi, localizado em Salvador/Bahia foi um dos

pioneiros, pois substituiu todo o sistema de climatização, até então 100% elétrico, por um sistema de cogeração, no qual motores movidos a gás natural produzem simultaneamente eletricidade e vapor para acionar “chillers” por absorção, por meio de uma caldeira de recuperação acionada pelos gases de exaustão desses motores. Menos de uma década depois, um sistema semelhante foi implementado no Shopping Jardins, localizado em Aracaju/Sergipe, utilizando os rejeitos térmicos de dois grupos moto-geradores para alimentar um “chiller” que opera conforme ciclo de absorção. Esta central de cogeração produz 636TR de água gelada para o sistema de ar condicionado do shopping.

No período posterior a essas iniciativas, correspondente a meados da última década, o aumento do nível dos reservatórios das hidroelétricas associado à construção de novas usinas termoelétricas, movidas principalmente a gás natural, levou novamente ao incremento da oferta de energia elétrica no mercado brasileiro como um todo, e assim, de acordo com Catão (2008), foi retomado o uso de equipamentos resfriadores de líquido (“chillers”) movidos por este insumo em todas as aplicações, inclusive as comerciais. Como consequência, a difusão no tocante ao uso de equipamentos por absorção sofreu uma brusca interrupção, bem como os estudos de viabilidade econômica e financeira dos mesmos. Entretanto, no começo desta década, o nível dos reservatórios das hidroelétricas voltou a diminuir, causando preocupação da sociedade quanto a segurança no fornecimento de energia elétrica, bem como quanto ao encarecimento das tarifas em função do uso de termoelétricas. O que é discutido neste trabalho é como o gás natural pode ser inserido, na conjuntura energética atual, de forma a minimizar perdas e custos adicionais desnecessários. Uma das alternativas consiste em proceder com a construção de termoelétricas movidas principalmente a gás natural, enquanto a segunda alternativa constitui em diversificar a gama de insumos energéticos para aplicações de conforto térmico, situadas principalmente no setor comercial, desonerando os mesmos em mais de 50% de seu consumo de eletricidade, que poderia ser direcionada para outros setores da economia nos quais não é possível prover tais modificações.

O uso de gás natural como insumo energético para termoeletricas, do ponto de vista técnico significa uma perda significativa no teor energético deste insumo, pois, conforme pode ser verificado no diagrama de Sankey mostrado na Figura 2.2, ao percorrer este fluxo, a energia contida no insumo energético virá a sofrer maior quantidade de perdas devido ao maior número de processos envolvidos entre a produção (conversão energética), transmissão de energia elétrica da usina até a distribuidora, distribuição dentro do centro urbano e, por fim, a transformação de energia elétrica em capacidade frigorífica no resfriador de líquido.

Figura 2.2 – Diagrama de Sankey mostrando as perdas geradas durante o processo atual de uso do gás natural como insumo energético para aplicações comerciais de climatização



Fonte: Elaboração própria (2013).

Os fluxos energéticos mostrados na Figura 2 refletem o quadro atual do uso de gás natural para aplicações de climatização no setor comercial brasileiro, no qual a energia proveniente do gás natural sofre sucessivas perdas no seu teor energético, desde a entrada do insumo até a transformação final que ocorre nos “chillers”. Dados contidos no BEN2011 (MME, 2012b) e compilados na Tabela 2.1 fornecem uma quantificação precisa das eficiências e perdas existentes neste fluxo energético atual.

Tabela 2.1 - Eficiências existentes na cadeia atual de geração termoelétrica de eletricidade

ETAPA DO PROCESSO	EFICIÊNCIA(η)
1 - Conversão da energia proveniente da combustão do gás natural em energia elétrica na TERMOELÉTRICA.	$\eta_1 = 36\%$
2 – TRANSMISSÃO da energia elétrica desde a planta termoelétrica até os centros urbanos.	$\eta_2 = 91\%$
3 – DISTRIBUIÇÃO da energia elétrica dentro dos centros urbanos.	$\eta_3 = 91\%$
EFICIÊNCIA GLOBAL	$\eta_g = 29,82\%$

Fonte: BEN2011 (2012).

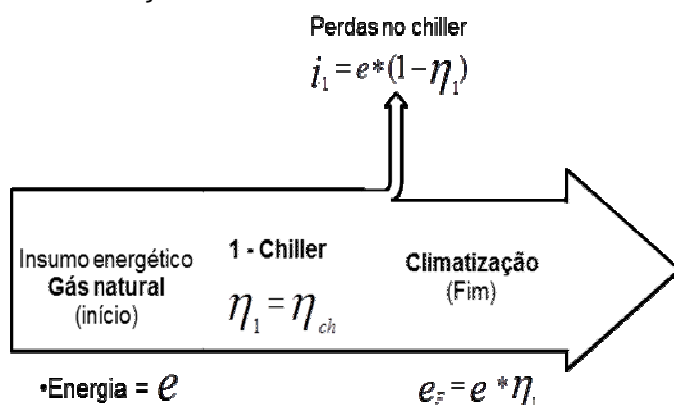
Com base nos dados da Tabela 2.1, pode-se observar que de cada 100kW de gás natural que são inseridos na usina termoelétrica, apenas 29,82kW chegam de fato no quadro de ligação do “chiller” existente no Shopping Center. Do ponto de vista financeiro, utilizar usinas termoelétricas movidas a gás natural ou por meio de qualquer outro insumo de energia ainda apresenta mais um agravante, que é o custo da ociosidade. De acordo com dados oriundos do BEN2011 (MME, 2012b), o sistema brasileiro de geração de energia elétrica abriga uma peculiaridade: as usinas termelétricas dão mais lucro quando ficam paradas do que quando produzem, e essa remuneração pela ociosidade é paga pelo contribuinte. Com pequenas variações que dependem das estações do ano, 88% da energia elétrica consumida no Brasil vêm das usinas hidrelétricas, 9% das termelétricas, 2% das nucleares e 1% das eólicas. A operação das usinas é controlada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), cuja atribuição é garantir que o consumo seja atendido sempre ao menor custo.

Como o menor custo é sempre das hidrelétricas, já que estas não usam combustível, as termelétricas entram em ação apenas nos períodos em que os reservatórios das hidrelétricas estão muito baixos, em razão da falta de chuva. Ocorre que o contrato feito pelo ONS com as termelétricas prevê duas modalidades de remuneração. A primeira paga as despesas operacionais e

com combustível que estas têm ao gerar energia. A quantia é calculada com base na expectativa de geração futura da usina. A segunda modalidade é uma espécie de taxa de aluguel, isto é, a usina é remunerada apenas por estar a postos sempre que o ONS precisar de seus serviços. O dinheiro entra nos cofres da empresa dona da termelétrica sem que uma única turbina seja acionada. Nos períodos em que está paralisada, como não tem despesas operacionais, tudo o que entra é receita. Algumas termelétricas cobram mais caro pelos períodos ociosos a fim de diminuir o preço cobrado pela energia que efetivamente produzem.

Uma alternativa racional de reduzir essas perdas energéticas e financeiras, e de impulsionar o aumento da eficiência energética global seria a relocação no tocante à alocação do gás natural na cadeia energética atual, por meio da inserção do mesmo apenas na última etapa da cadeia, ou melhor, fazer uso de equipamentos resfriadores de líquido que funcionem conforme ciclo de refrigeração por absorção e utilizem diretamente o gás natural como insumo energético. O diagrama de Sankey mostrado na Figura 2.3 ilustra como deveria operar a cadeia racional de consumo energético para o gás natural, por meio da inserção direta deste insumo em uma das finalidades que mais contribuem para o incremento do consumo energético, que são as aplicações de climatização para fins comerciais.

Figura 2.3 – Diagrama de Sankey mostrando as perdas durante o processo proposto de uso do gás natural como insumo energético para aplicações comerciais de climatização



Fonte: Elaboração própria (2013).

Outros aspectos que devem permear todo e qualquer estudo deste tipo são análises feitas no tocante à questão energética atrelada às peculiaridades qualitativas no que concerne às formas de energia envolvidas, pertinentes aos conceitos de exergia e suas aplicações, bem como uma análise de viabilidade econômica, para que possa existir um incentivo financeiro para os agentes envolvidos. Estes aspectos, que são também objetivos centrais deste trabalho vêm sendo historicamente abordados em outros estudos, conforme discutido a seguir.

Os equipamentos que operam conforme ciclos de compressão a vapor, devido ao seu “pioneirismo” no que se refere ao uso em larga escala no mercado, possuem a maior e mais antiga quantidade de estudos efetuados sobre suas performances e eficiências. Após a segunda guerra, Lorentzen (1952) estabeleceu uma relação entre a eficiência de resfriadores de líquido e a velocidade de rotação dos compressores alternativos até então largamente utilizados nesses equipamentos. McGrath (1957) mostrou de forma prática a relação entre a eficiência energética e menor consumo elétrico por parte de “chillers” por compressão então existentes no mercado americano e europeu. Cooper (1974) estabeleceu relações entre as eficiências de “chillers” elétricos e as condições do fluido refrigerante na sucção dos compressores desses equipamentos. Shaw (1977) e Stillson (1977) elaboraram estudos detalhados a respeito de equipamentos que utilizam compressores tipo parafuso, uma inovação tecnológica naquela época. Lorentzen (1983) fez uma coletânea de alguns estudos desenvolvidos até então e de procedimentos a serem realizados de forma a maximizar a eficiência energética de equipamentos elétricos existentes no mercado. Lorentzen (1984) realizou ainda um dos primeiros estudos pertinentes à análise exérgica aplicada aos ciclos de refrigeração por compressão que regem os equipamentos elétricos, onde foi evidenciado que um dos componentes padrão deste equipamento, a então considerada “inofensiva” válvula de expansão, na realidade constitui uma enorme fonte de perdas no teor exérgico existente. Posteriormente, Lorentzen (1986), estendeu as análises exérgicas para os demais componentes do ciclo de refrigeração por compressão, ilustrando de forma clara e sob a forma de gráficos e diagramas os fluxos exérgicos existentes no

mesmo, mostrando onde são geradas as irreversibilidades decorrentes do funcionamento normal desses equipamentos. Addy (1986) fez um estudo pioneiro no que se refere ao uso de inversores de frequência na alimentação elétrica dos compressores e, conseqüentemente, determinou o comportamento da eficiência energética de um equipamento em condições de regime parcial do compressor elétrico.

No mesmo ano, Spauschus (1987) fez o que pode-se chamar de um histórico de todos os progressos experimentados pela indústria de refrigeração e ar condicionado, progressos estes apenas pertinentes ao campo dos equipamentos elétricos, desde o pós-guerra até a data de publicação do artigo, também estabelecendo projeções sobre as tecnologias vindouras que poderiam prover maiores eficiências desses. Szargut (2002) apresentou uma completa análise exérgica e diagnóstico para um equipamento elétrico que opera segundo ciclo de compressão a vapor, no qual além de mostrar os fluxos exérgicos internos, também estabeleceu as relações de exergia existentes entre o equipamento e suas interfaces externas (transferência de calor e consumo de energia elétrica). De acordo com este estudo, a energia elétrica é uma forma de energia de altíssima qualidade, apresentando uma exergia igual a sua energia, fator de conversão este de fundamental importância para o estudo. Yumrutas, Kunduz e Kanoglu (2002) realizaram uma análise exérgica de um equipamento elétrico, que opera conforme ciclo de compressão a vapor, sob diferentes condições de temperatura, tanto externas como interna. Grein e Pehnt (2011) fizeram uma análise energética de “chillers” elétricos para aplicações comerciais, porém aliando a estes sistemas de termoacumulação, de forma a incrementar a eficiência sua global sob as condições de demanda variável, que representam os casos reais de aplicações comerciais deste gênero.

Mais recentemente, estudos de Lee (2010), Cecchinato (2010), Yu et al. (2013) e Vakiloroaya, Ha e Samali (2013) apresentam as tecnologias atuais do uso de inversores de frequência em “chillers” elétricos, aumentando significativamente sua eficiência, principalmente em regime de carga parcial ou IPLV. Seguindo o viés de procurar a otimização energética de “chillers” elétricos, Liu et al. (2012) demonstraram que, devido a progressos nos

processos de usinagem dos seus componentes, os compressores tipo “parafuso”, mais eficientes, devem equipar a maior parte dos “chillers” elétricos a serem produzidos nos próximos anos, o que viria a incrementar a eficiência destes equipamentos em todas as faixas de aplicação.

Devido ao que pode-se considerar como seu “recente” uso em aplicações de condicionamento de ar para fins comerciais, os estudos relativos aos ciclos de absorção apresentam-se em grande parte mais recentes do que seus similares por compressão. Nowotny (1983) elaborou um estudo sobre as condições de trabalho consideradas perfeitas para um equipamento de absorção de simples efeito, que opera por queima direta e utiliza como fluido refrigerante o par água-amônia. Pode-se considerar este estudo como pioneiro, pois foi o primeiro que apresentou uma abordagem exergética das performances e eficiências de um equipamento deste tipo, provendo resultados extremamente satisfatórios. Cortez (1984) apresentou um estudo pioneiro no Brasil, mostrando os potenciais existentes no mercado nacional para os equipamentos por absorção, incluindo a possibilidade do uso em larga escala na climatização comercial. Porém, segundo aquele mesmo estudo, a baixa eficiência dos equipamentos de simples efeito e que operavam utilizando água-amônia ainda eram uma barreira para a difusão destes.

Szargut, Morris e Steward (1988) e Kotas (1995) incluíram em seus estudos de análise exergética para processos térmicos um estudo de caso aplicado a equipamentos que operam conforme ciclo de absorção de simples efeito, utilizando não apenas o par água-amônia, mas também o par brometo de lítio-água como fluido de trabalho.

Os primeiros estudos sobre o ciclo de absorção e suas eficiências foram todos focados nas máquinas de simples efeito até os anos 1990, onde o desenvolvimento em escala comercial dos equipamentos de duplo efeito abriu um novo leque de oportunidades para esta indústria. Talbi e Agnew (2000) apresentaram um estudo para uma unidade de absorção com duplo-efeito, que utilizava como refrigerante o par brometo de lítio-água como fluido refrigerante. Aquela análise baseou-se em parâmetros energéticos e exergéticos, na qual várias modificações foram sugeridas aos componentes do ciclo de forma a

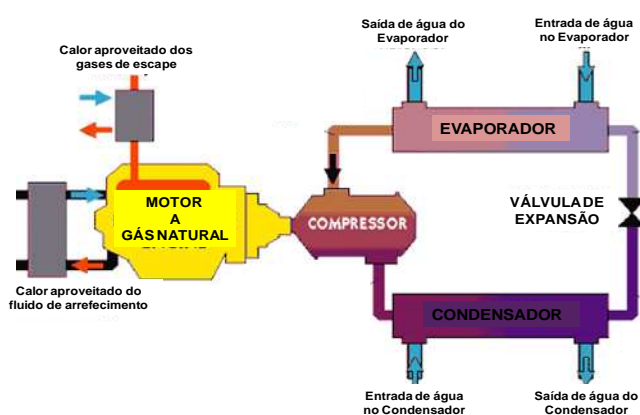
obter uma maximização de sua eficiência. Seguindo-se essas sugestões, os mesmos conseguiram chegar a um coeficiente de performance igual a 1,08, o que pode ser considerado um valor extremamente satisfatório para equipamentos deste tipo na época. Morosuk e Tsatsaronis (2007) realizaram um inovador estudo de ordem energética e exergética para máquinas por absorção, no qual conseguiram, com sucesso, fazer uma análise onde dividiram as perdas exergéticas ou irreversibilidades para cada componente do equipamento em parcelas “endógenas” ou produzidas pelo componente em si, ou “estruturais”, que são produzidas pela interação do componente com os demais do equipamento. O resultado daquele estudo nos fornece uma melhor compreensão dos fatores que geram as perdas de eficiência destes tipos de equipamento.

Dentro do contexto apresentado, a maioria dos trabalhos consistiu em estudos teóricos embasados em considerações práticas. Porém, Torrella et al. (2009) realizaram uma avaliação em tempo real para um “chiller” de queima direta e duplo efeito que utilizou gás natural como fonte de combustível. As medições foram realizadas em três “chillers” de 500TR cada e, por meio de variações induzidas nas condições de operação (vazão de combustível e temperatura do evaporador), foram obtidos valores de coeficiente de performance entre 0,82 e 1,25. Karamangil et al. (2010) simularam um ciclo de absorção por simples efeito, porém utilizando outros fluidos de trabalho alternativos, como o par amônia-nitrato de lítio ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$), em comparação com os pares correntemente utilizados no mercado que são água-amônia ($\text{H}_2\text{O/NH}_3$) e brometo de lítio-água ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$). Os resultados obtidos mostraram que o par amônia-nitrato de lítio apresenta-se com um desempenho similar à do par água-amônia, porém inferior se comparado ao par água-brometo de lítio. Pratihari, Kaushik e Agarwal (2012) também simularam o funcionamento de uma unidade de absorção que opera conforme simples efeito e utiliza o par água-amônia, porém aquele estudo teve como foco os processos de transferência de calor no absorvedor, através da relação entre o coeficiente de desempenho do equipamento e a superfície disponível para troca de calor no absorvedor. De acordo com aquela análise, conseguiu-se uma expressão para determinar a área ideal de troca de calor no absorvedor. Recentemente, Farshi,

Mahmoudi e Rosen (2013), propõem a instalação de um ejetor entre o gerador e o condensador para um equipamento de duplo efeito que opera com o par brometo de lítio-água. Conclui-se que a melhora no desempenho do equipamento justifica sobremaneira os investimentos adicionais para instalação deste ejetor. Seguindo a linha de observações almejando incrementar a eficiência dos “chillers” por absorção, Kaita (2002), Gebreslassie, Medrano e Boer (2010) e Dincer e Rosen (2012) realizaram análises energéticas e exérgicas em “chillers” por absorção de triplo efeito, obtendo valores para coeficientes de desempenho superiores a 1.9, e com Gebreslassie, Medrano e Boer (2010) prevendo a inserção destes equipamentos no mercado até o final desta década.

Outros estudos abordam o uso do gás natural como insumo energético de “chillers” que operam através de um compressor mecânico, como funcionam os chillers elétricos, porém acionados através de um motor de combustão interna movido a gás natural. Esta tecnologia, chamada de GEC é ilustrada por meio da Figura 2.4, onde, de acordo com Sun (2008) e Elgendy et al. (2010), o coeficiente de desempenho desses chillers pode chegar a 2,2, valores superiores aos encontrados em “chillers” por absorção. Entretanto, esta tecnologia não é disponível em larga escala no mercado nacional, devido principalmente aos altíssimos custos de aquisição/instalação envolvidos (mais de R\$ 4000/TR), por isso não está incluída nesse trabalho.

Figura 2.4 – Esquema de operação para um “chiller” tipo GEC



Fonte: Elgendy, et al.(2010).

Sun (2008) preconiza o uso de “chillers” GEC como um passo fundamental na difusão do gás natural como insumo energético para aplicações de climatização como um todo, porém ainda necessitando aos mesmos a produção em carga escala visando redução de custos.

Do ponto de vista da viabilidade econômica dos equipamentos que operam conforme o ciclo de absorção, poucas são as publicações que fazem comparações puras e diretas entre os “chillers” por compressão elétricos, e os “chillers” de absorção a gás natural. Moné, Chau e Phelan (2001) apresentaram um bem sucedido estudo visando mostrar a viabilidade econômica de um sistema de cogeração industrial, onde o “chiller” por absorção é acionado pelos gases de exaustão de turbinas a gás existentes no mercado. Santos (2005) realizou um estudo de viabilidade econômica, porém tomando-se como base o sistema de cogeração existente no Shopping Iguatemi de Salvador-Bahia, onde o “chiller” por absorção é acionado pelos gases de exaustão oriundos de um motor de combustão interna.

No âmbito da comparação pura e direta entre os equipamentos elétricos e a gás natural, Shekarchian et al. (2011) efetuaram um estudo no qual confrontaram, do ponto de vista puramente econômico, “chillers” elétricos e por absorção a gás natural para aplicações comerciais no mercado iraniano. Aquele estudo mostra-se de particular relevância, pois estabelece uma relação linear real entre os custos de aquisição de um equipamento e sua eficiência (quanto maior a eficiência maior os custos). Naquele trabalho chega-se a conclusão de que, baseados nos baixos preços de gás natural praticados no mercado iraniano, os “chillers” por absorção apresentam uma vantagem no custo operacional de US\$ 50 por ano para cada metro quadrado climatizado. O ponto fraco daquele estudo é que o mesmo relaciona diretamente os custos por metro quadrado de área climatizada, porém uma relação direta entre capacidade frigorífica e área não é aplicável ao Brasil, devido às grandes diferenças de condições externas encontradas no país. Além disso, os preços do gás natural vigentes no Irã são bastante diferentes dos utilizados no Brasil ($0,07\text{US}\$/\text{m}^3$ no Irã contra uma média de $0,6\text{US}\$/\text{m}^3$ no Brasil). Em âmbito nacional, Almeida, Torres e Santos (2003) realizaram um estudo de viabilidade econômica fundamentado apenas nos custos operacionais relacionados com

as tarifas de gás e eletricidade vigentes à época no estado da Bahia, encontrando uma vantagem superior a 30% em prol dos “chillers” por absorção. Módenes et al. (2012) realizaram um estudo econômico semelhante ao de Almeida, Torres e Santos (2003) , utilizando as tarifas de gás natural vigentes para o estado de São Paulo. Com base naquele estudo chega-se à conclusão de que, para todas as faixas de capacidade, os equipamentos de absorção mostram-se competitivos economicamente, fornecendo princípios de comparação entre os sistemas de importante valia para o presente estudo. O ponto negativo dos trabalhos de Almeida, Torres e Santos (2003) e Módenes et al. (2012) é que os mesmos não verificam a viabilidade financeira do investimento tomando-se como base o tempo de retorno de investimento para os que optarem pela utilização de “chillers” por absorção. Além disso, as comparações técnicas baseiam-se nas eficiências dos equipamentos em si, não relacionando estas à cadeia energética na qual estes “chillers” podem estar inseridos.

Nos tópicos que se seguem, apresentam-se de forma detalhada os conceitos tratados no decorrer deste trabalho, bem como os fatores e equações utilizadas para quantificar as grandezas a serem comparadas, e assim, realizarem se os estudos comparativos técnicos e de viabilidade econômica propostos neste estudo.

2.2 EXERGIA

A busca por um melhor aproveitamento dos recursos energéticos é uma necessidade constante em todos os setores de nossa sociedade, motivada por restrições ambientais e gerenciamento de custos. A energia em suas diversas formas e usos, representa um insumo indispensável aos mais variados setores da indústria. É possível afirmar que a rentabilidade de uma indústria está diretamente relacionada à forma com que seus recursos energéticos são empregados. Sendo assim, destacam-se plantas que possuem menores gastos e maior reaproveitamento energético. Desta forma, de acordo com Silva, Costa Junior e Costa (2012), a indústria necessita aperfeiçoar cada

vez mais o aproveitamento de energia, uma vez que isto pode diminuir o custo do processo.

Um dos objetivos da termodinâmica é estabelecer critérios gerais a fim de valorizar o funcionamento e projeto de sistemas industriais no qual a energia tem um papel importante. Como por exemplo, é evidente a importância de se desenvolverem sistemas térmicos que utilizem eficientemente recursos energéticos não renováveis, como petróleo, gás natural e carvão (OLIVEIRA, 2012). Portanto, ao analisar estes processos, é importante estabelecer uma forma de determinar sua eficiência (MORAN; SHAPIRO, 2009).

O método da análise exérgica é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais (KOTAS, 1995). Isto é possível uma vez que este conceito está intimamente ligado aos fundamentos da 2ª Lei da Termodinâmica.

Exérgia é definida por Dincer e Rosen (2012) como sendo o maior trabalho teórico possível de ser obtido conforme o ambiente de referência interaja até o equilíbrio com o sistema de interesse. Consequentemente, segundo Szargut, Morris e Steward (1986), a exérgia é uma medida do potencial de um fluxo de energia para ser transformada em energia de alta qualidade. A análise exérgica tem sido empregada desde os anos 1970, almejando encontrar usos mais racionais da energia, ou seja, ao mesmo tempo reduzir o consumo de combustíveis fósseis e transformando a aplicação de eficiência energética. Também é possível realizar comparações exérgicas entre dois equipamentos distintos, de forma a verificar qual destes faz maior uso racional de seus insumos energéticos.

A definição matemática de exérgia, segundo Kotas (1995), é apresentada na Equação (2.1), onde verifica-se que ela se divide em cinco parcelas: física ou termomecânica (f), química (q), elétrica (el), potencial (p) e cinética (c).

$$Ex = Ex^f + Ex^q + Ex^{sl} + Ex^p + Ex^c$$

(2.1)

A exergia física ou termomecânica de fluxo, de acordo com Szargut, Morris e Steward (1986), é obtida por meio da aplicação de balanços de energia e entropia para um sistema interagindo com o meio ambiente, e desprezando-se as variações de energia cinética e potencial, conforme observado na Equação (2.2).

$$\dot{Ex}^f = \dot{m} * [(h - h_0) - T_0 * (s - s_0)]$$

(2.2)

Na análise exergetica da energia elétrica, de acordo com Kotas (1995), o coeficiente para energia elétrica é considerado unitário, então 1kJ de energia elétrica corresponde a um fluxo de exergia de 1kJ. Para este trabalho, é perfeitamente válido considerar desprezíveis as variações exergeticas de cunho cinético e potencial, devido às pequenas variações de velocidade encontradas e também pelos valores diminutos de altura dos equipamentos estudados. Fundamentada no poder calorífico inferior (PCI) de um determinado combustível, a Equação (2.3) é utilizada para o cálculo da exergia química de combustíveis fósseis em geral, segundo Szargut, Morris e Steward (1986).

$$Ex^q = \beta * PCI$$

(2.3)

Onde o fator β , ainda de acordo com Szargut, Morris e Steward (1986), é calculado primeiramente tomando como base o tipo de combustível (gasoso, líquido ou sólido), e em um segundo plano depende de uma relação de

regressão que tem como fatores principais a relação entre átomos de hidrogênio e carbono (H/C) e o número de átomos de carbono (N_C) presentes na molécula deste combustível. Para os combustíveis hidrocarbonetos gasosos, que é o caso do gás natural, o fator β é calculado por meio da Equação (2.4), que conforme os estudos de Santos (2005) e Santana (2003) apresenta uma precisão maior que 99,5% quando confrontado com os dados reais.

$$\beta = 1,0334 + 0,0183 * (H/C) + 0,0694 * (1/N_C)$$

(2.4)

2.3 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO PARA FINS COMERCIAIS

O propósito da climatização comercial é manter, nos níveis desejados, a temperatura, umidade, pureza e distribuição de ar no estabelecimento a ser condicionado. Para atingir este objetivo, vários tipos de sistemas tem sido projetados e utilizados. Na correta seleção dos sistemas de climatização, de acordo com Miller e Miller (2011), os clientes devem concordar em relação à necessidade e à qualidade do condicionamento de ar, e chegar a um acordo relativo às exigências, atendendo todas as normas correlatas.

No projeto, instalação e operação de um sistema de climatização, além da parte técnica, os aspectos econômicos envolvidos representam fatores essenciais (YAMANE; SAITO, 1986). No planejamento e no projeto do sistema de climatização, devem se considerar os seguintes fatores econômicos:

- a) Custos Iniciais (aquisição e instalação de máquinas e acessórios);
- b) Custos operacionais.

Os custos iniciais estão relacionados à disponibilidade de investimento por parte do comprador em arcar com aquisição e instalação de equipamentos e acessórios, representando um fator determinante na seleção do sistema de

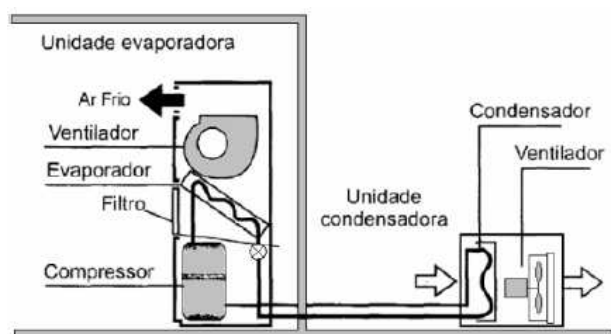
condicionamento de ar. Já os custos operacionais são decorrentes de fatores como depreciação do equipamento e encargos variáveis, que consistem no consumo energético e custos de manutenção decorrentes do uso destes equipamentos. Naturalmente, de acordo com Costa (1991), o sistema de climatização mais favorável é aquele que apresenta um custo total menor dentro de um tempo estipulado, e produz os efeitos desejados.

Os equipamentos de climatização comercial são múltiplos quanto a tipos e aplicações. Para fins de climatização técnica, de acordo com Creder (2004), podemos dividir estes equipamentos em dois tipos:

- a) Sistemas de expansão ou evaporação direta;
- b) Sistemas de expansão indireta.

Nos sistemas de expansão direta, o equipamento realiza diretamente a remoção de calor do ambiente a ser climatizado, por meio da passagem do ar deste recinto pelo evaporador do equipamento, logo o fluido refrigerante evapora ao entrar em contato com o ar, conforme ilustrado na Figura 2.5. Estes sistemas são bastante utilizados em instalações de pequeno porte, e eventualmente para instalações de médio porte, e tem como principais vantagens, segundo Creder (2004), os baixos custos de aquisição dos equipamentos, principalmente devido ao fato de não possuírem rede hidráulica associada ao evaporador, além da facilidade em sua operação. As desvantagens dos sistemas de expansão direta são visíveis em aplicações acima de 50TR, pois estes começam a ocupar muito espaço nos recintos a serem climatizados.

Figura 2.5 – Sistema de climatização por expansão direta



Os equipamentos pertinentes aos sistemas de expansão direta são mostrados na Figura 2.6, onde os equipamentos tipo compacto, também chamados de ar condicionado de janela ou ACJ são empregados em instalações cuja demanda de climatização varia entre 0,5TR e 3TR, enquanto os “split-system”, cujo nível de ruído decorrente do funcionamento é menor, mostram-se mais adequados a uma faixa de capacidade entre 0,8TR e 5TR. Estabelecimentos maiores geralmente utilizam os “self-contained”, cuja capacidade apresenta-se entre 5TR e 30TR.

Figura 2.6 – Equipamentos de expansão direta: 1-ACJ, 2-“split-system” e 3-“self-contained”



Fonte: Creder (2004).

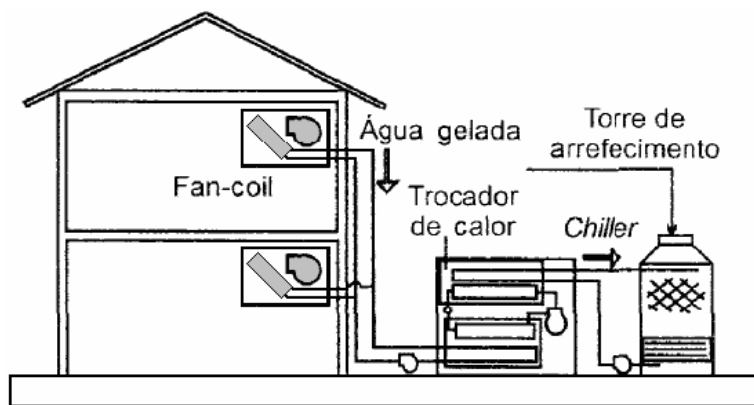
Quanto ao insumo energético empregado para acionamento dos equipamentos de expansão direta, os equipamentos disponíveis no mercado são em sua totalidade elétricos, portanto não é possível incluir neste trabalho o estudo de viabilidade do gás natural para estas aplicações. Mas é importante saber que, para aplicações inferiores a 50TR, existe como opção de menor custo o uso de equipamentos por expansão direta acionados exclusivamente por meio de energia elétrica.

A climatização de grandes edifícios, segundo Costa (1991), exige sistemas que possuam precisão de funcionamento, consumo de energia satisfatório, facilidade de operação, autonomia de funcionamento em cada setor e, atualmente, possibilidade de interface de comunicação e controle com um sistema de gerenciamento predial computadorizado. Obviamente, em um grande edifício, a aplicação de aparelhos individuais de climatização por

expansão direta em cada sala ou em um conjunto de salas não satisfaz os objetivos pretendidos por um sistema eficaz. O consumo de energia, a manutenção trabalhosa, a dificuldade de monitoramento do funcionamento e o impacto visual de condensadores expostos na fachada, bem como de evaporadores nos ambientes são as principais desvantagens do uso desses condicionadores.

Para uso em estabelecimentos de grande porte, os sistemas centrais de expansão indireta minimizam os problemas de espaço ocupado, pois a climatização do ambiente se dá por meio de um fluido intermediário, geralmente a água. Nestes sistemas, conforme ilustrado na Figura 2.7, o equipamento resfriador de líquido ou “chiller” refrigera a água que é bombeada através de uma rede hidráulica, na qual são conectados trocadores de calor ou “fan-coils”, que tem por função retirar o calor do ar e assim climatizar os ambientes em que estão instalados. Os “fan-coils” recebem água refrigerada e as devolve com temperatura pouco elevada. A água que retorna dos “fan-coils” é bombeada de volta até o “chiller”, que inicia outro curso de refrigeração (CREDER, 2004).

Figura 2.7 – Sistema de climatização por expansão indireta



Fonte: Costa (1991).

Nos sistemas de expansão indireta, o “chiller” assume um papel fundamental, pois este, de forma centralizada, é o responsável pelo resfriamento da água que irá climatizar todos os recintos do estabelecimento. O “chiller”, mostrado na Figura 2.8, é uma máquina frigorífica que pode, de

acordo com os equipamentos disponíveis no mercado, ser classificado conforme o insumo energético utilizado, em duas classes:

- a) “chillers” elétricos que funcionam conforme ciclo de compressão de vapor;
- b) “chillers” movidos a gás natural, que operam conforme ciclo de absorção.

Figura 2.8 – Equipamento resfriador de líquido ou “chiller”



Fonte: Stoecker (2009).

Em ambas as classes, os “chillers” podem atender a demandas de climatização de 30TR até 1000TR por equipamento. Como desvantagens do uso de sistemas por expansão indireta, temos que, além dos custos iniciais elevados, os mesmos requerem manutenção mais especializada, de forma a evitar o congelamento da água destes sistemas (MILLER; MILLER, 2011).

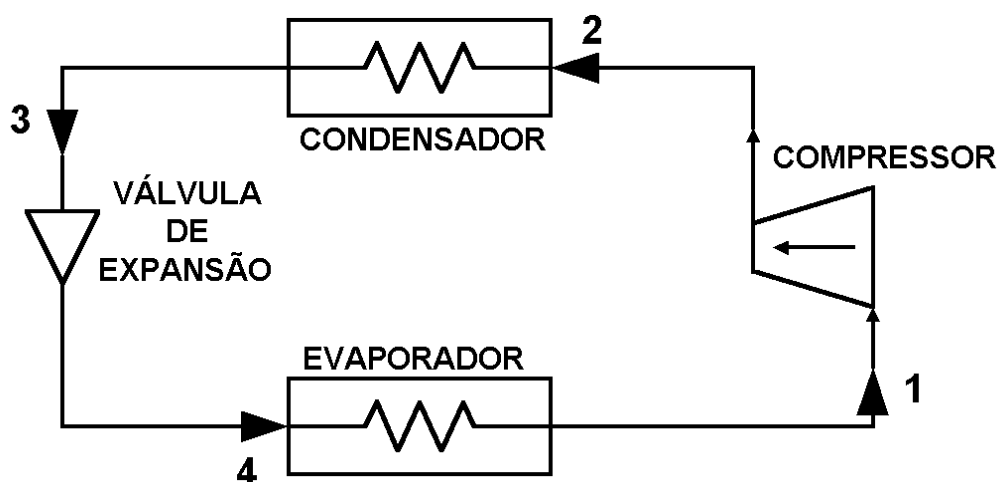
2.3.1 “Chillers” elétricos

Dentre todos os ciclos frigoríficos, o ciclo de compressão a vapor é o mais utilizado na prática, por todos os equipamentos elétricos, e conseqüentemente por mais de 95% dos “chillers” em operação no Brasil (ABRAVA, 2013). A Figura 2.9 mostra o ciclo básico de compressão a vapor, bem como seus componentes básicos (compressor, condensador, dispositivo

de expansão e evaporador) que, conforme Stoecker (2009), opera segundo quatro processos fundamentais:

- a) Processo 1-2: Compressão do fluido refrigerante, em seu estado de vapor, promovendo um aumento simultâneo de pressão e temperatura;
- b) Processo 2-3: Condensação do fluido refrigerante, por meio da redução de temperatura em alta pressão. Esta redução de temperatura pode ser feita em contato direto com o ar externo ou utilizando água como fluido intermediário, de forma a reduzir o tamanho do sistema;
- c) Processo 3-4: Estrangulamento do fluido refrigerante no dispositivo de expansão, o que promove uma redução brusca na pressão;
- d) Processo 4-1: Expansão e consequente evaporação do fluido refrigerante, absorvendo direta ou indiretamente o calor do recinto a ser condicionado.

Figura 2.9 – Esquema do ciclo de compressão a vapor



Fonte: Stoecker (2009).

A extração de calor do ambiente a ser climatizado correspondente ao processo 4-1 é a finalidade do ciclo. Todos os demais processos ocorrem com o intuito de transferir o calor retirado para um ambiente de temperatura mais alta que não interessa ao processo de climatização (STOECKER, 2009). O ciclo real de refrigeração por compressão a vapor, segundo Miller e Miller (2011), inclui variáveis intrínsecas, como a compressão não isoentrópica e as

perdas de carga existentes no evaporador e condensador, bem como variáveis de ordem prática, como o subresfriamento na saída do condensador, que garante apenas líquido na entrada do dispositivo de expansão, e o superaquecimento na entrada do compressor, de forma a evitar a entrada de líquido no mesmo. Estas variáveis causam redução de sua eficiência, se comparado com o ciclo ideal.

Para que uma avaliação técnica do desempenho de um ciclo de refrigeração possa ser feita, uma eficiência deve ser delimitada. Entretanto, segundo Stoecker (2009), para este ciclo, não pode-se determinar o desempenho através da eficiência, porque este termo é utilizado para denominar a razão entre as energias de entrada e saída. Tal razão poderia conduzir a interpretações equivocadas se aplicada a um sistema de refrigeração, uma vez que a energia (calor) que sai no condensador (processo 2-3), geralmente se perde. Por consequência, em um ciclo de compressão a vapor, a eficácia de um “chiller” é determinada através do coeficiente de desempenho (também chamado de coeficiente de performance ou COP), representado pela Equação (2.5) (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNACKE, 2001).

$$\text{COP} = \left| \frac{Q_L}{W} \right| = \left| \frac{\dot{m}_{\text{agua}} * (h_s - h_e)}{W_{el}} \right|$$

(2.5)

A Equação (2.5) relaciona o produto do equipamento, que é o calor retirado da água durante seu resfriamento, com o insumo, este representado pelo consumo elétrico principalmente por parte do compressor. Vale a pena ressaltar que os termos do coeficiente de performance devem ter as mesmas unidades de medida, para que este torne-se adimensional. De acordo com Miller e Miller (2011), um coeficiente de eficácia elevado é interessante, pois equivale a um pequeno consumo energético do compressor para uma correspondente refrigeração.

Com base nas premissas utilizadas para obtenção da Equação (2.5), e valendo-se da Equação (2.2), também pode ser efetuada uma avaliação de

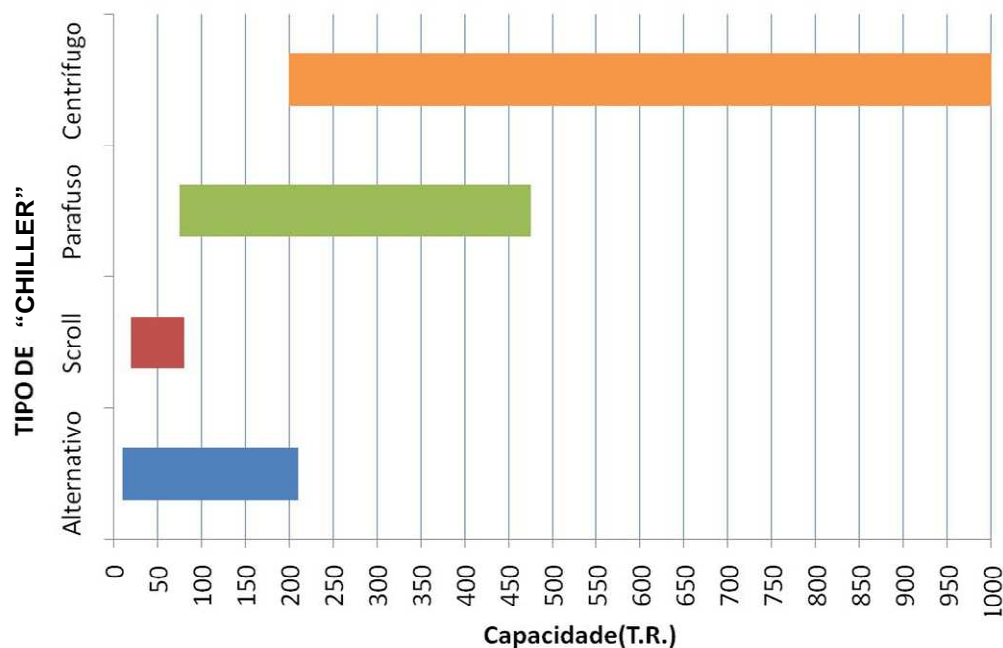
segunda lei, empregando para isso o conceito de eficiência exergética (Ψ), através da Equação (2.6), proposta por Kotas (1995).

$$\Psi = \left| \frac{\Delta E_{x_{\text{agua}}}}{W} \right| = \left| \frac{\dot{m}_{\text{agua}} * [(h_s - h_e) - T_0 * (s_s - s_e)]}{W_{el}} \right| \quad (2.6)$$

Por meio da Equação (2.6), pode-se calcular diretamente a eficiência de segunda lei do “chiller” a partir dos fluxos exergéticos do fluido refrigerado, assim como do consumo energético por parte do compressor. Vale a pena ressaltar que, durante o decorrer do trabalho, serão calculados e comparados os coeficientes de performance e eficiências exergéticas dos processos energéticos nos quais os equipamentos em questão (“chillers”) são protagonistas. Para isto, faremos constante uso das propriedades do fluido refrigerado em questão, no caso a água.

Dentro do contexto dos equipamentos que operam conforme ciclo de compressão de vapor acionados eletricamente, estes podem ser divididos conforme o tipo de compressor que utilizam. De acordo com esta classificação, os mesmos podem ter um compressor alternativo, “scroll”, parafuso ou centrífugo. A Figura 2.10 mostra, conforme Miller e Miller (2011), a faixa de aplicação de cada um destes compressores (disponíveis no mercado), em função da capacidade requerida para o “chiller” em questão.

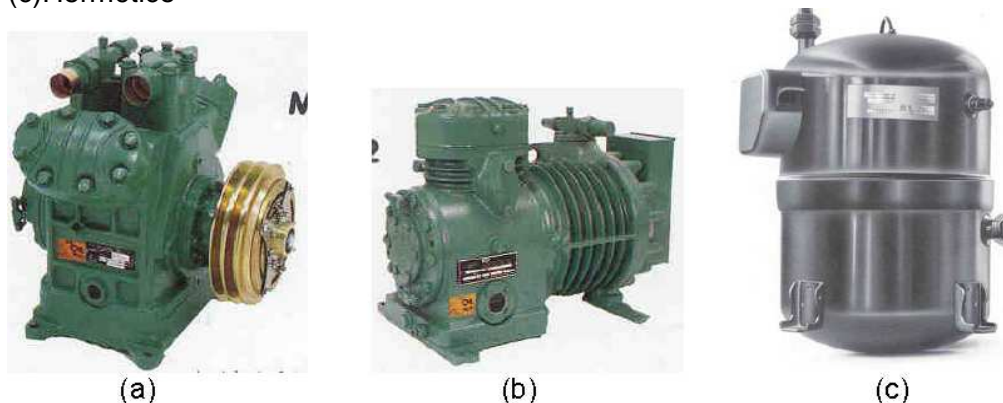
Figura 2.10 – “chillers” elétricos utilizados no mercado



Fonte: Miller e Miller (2011).

O compressor alternativo, também chamado de recíproco, vem sendo empregado nas indústrias de refrigeração e climatização desde os primeiros equipamentos, datados dos anos 1940 (MILLER; MILLER, 2011). Para aplicações de refrigeração e climatização, segundo Stoecker (2009), este tipo de compressor pode ser classificado em aberto, semi- hermético e hermético. No compressor aberto, o eixo de acionamento atravessa a carcaça, sendo, portanto, acionado por um motor exterior, como ilustrado na Figura 2.11. O emprego de um selo de vedação deve ser previsto a fim de evitar fuga de gás refrigerante ou penetração de ar externo quando a pressão for menor que a atmosférica. O compressor aberto é empregado em instalações de amônia, podendo também ser utilizados compostos halogenados.

Figura 2.11 – Compressores alternativos: (a) Aberto, (b) Semi-hermético e (c) Hermético



Fonte: Silva (2009).

No compressor semi-hermético, a carcaça exterior aloja tanto o compressor propriamente dito quanto o motor de acionamento, como pode também ser observado na Figura 2.11. Nesse tipo, que opera com compostos halogenados, o refrigerante entra em contato com o enrolamento do motor, resfriando-o. Esse compressor deve sua denominação ao fato de permitir a remoção do cabeçote, tornando acessível o compressor (válvulas, pistões, etc.) ou motor.

Os compressores herméticos são semelhantes aos semi-herméticos, destes diferindo pelo fato de ter uma carcaça totalmente blindada, onde o motor e conjunto de compressão estão encerrados num só corpo impedindo o acesso interno (Figura 2.11). Isto resulta na redução de tamanho da carcaça e elimina o problema de vazamento com o uso de um selo mecânico. Entretanto tanto o hermético como o semi-hermético perdem um pouco de sua eficiência em virtude do aquecimento do refrigerante, promovido pelo enrolamento do motor elétrico. Os compressores herméticos são utilizados em refrigeradores domésticos e condicionadores de ar até potências da ordem de 9TR.

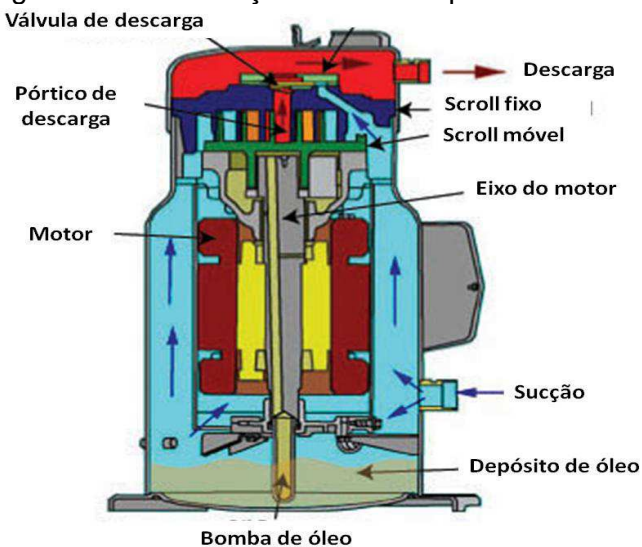
Em comparação com os demais tipos de compressores, os alternativos apresentam poucas vantagens e uma série de desvantagens. Podemos citar como pontos positivos dos “chillers” que utilizam compressor alternativo, os custos de manutenção relativamente baixos e o fato de serem equipamentos amplamente difundidos no mercado. Por outro lado, estes equipamentos encontram-se defasados com relação aos demais, sob o ponto de vista da

eficiência energética. Além disso, se comparado com os outros tipos de compressores, o alternativo apresenta uma quantidade bem maior de partes móveis, o que aumenta exponencialmente, segundo Silva (2009), a possibilidade de falha por quebra mecânica.

Devido principalmente à sua menor eficiência, os “chillers” elétricos que utilizam compressor alternativo vem perdendo gradativamente sua participação no mercado de “chillers”, principalmente para os equipamentos que utilizam compressores “scroll” e parafuso, a depender da faixa de aplicação.

O conceito do compressor “scroll” tem estado disponível por mais de cem anos. Mesmo assim, o desenvolvimento da tecnologia do compressor “scroll” moderno começou, segundo Miller e Miller (2011) no final da década de 1970. A introdução de máquinas com controle numérico proporcionou as bases para a mecanização com adequada precisão dos elementos necessários para que um compressor “scroll” possa operar silenciosamente e eficientemente. A tecnologia do compressor “scroll”, ilustrado na Figura 2.12, é amplamente utilizada em aplicações de ar condicionado e refrigeração, e cobrem uma grande variedade de operação usando diversos refrigerantes. Geralmente os compressores “scroll” são de desenho hermético, mas também produzem algumas variantes semi-herméticas.

Figura 2.12 – Ilustração de um compressor “scroll” em corte



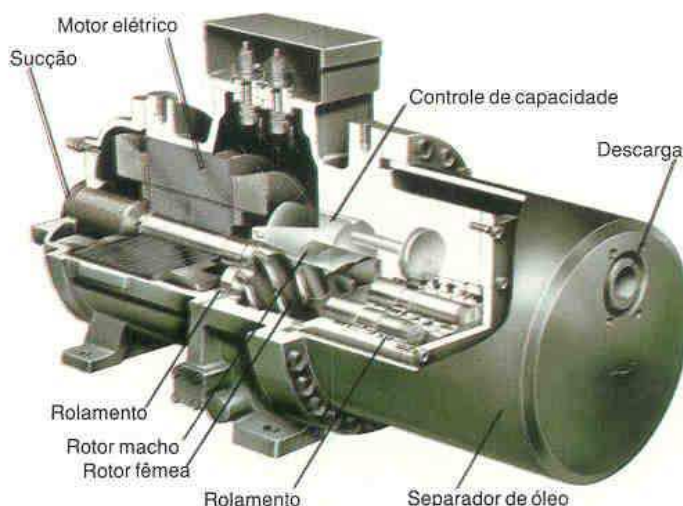
Fonte: Miller e Miller (2011).

As vantagens dos “chillers” que utilizam compressores “scroll” são que estes equipamentos possuem um funcionamento mais silencioso e eficiente que os compressores alternativos similares, e devido a menor quantidade de partes móveis, mais confiáveis. Entretanto, os compressores “scroll” não possuem grandes capacidades, fazendo com que sua aplicação seja restrita à faixa de 10TR até 90TR.

A criação do primeiro compressor tipo parafuso data do século 19, porém, devido às dificuldades na precisão dos métodos antigos de usinagem e manufatura que causavam defeitos constantes e falta de confiabilidade dos mesmos, o compressor parafuso começou a ser comercialmente utilizado, para fins de climatização e refrigeração, apenas no início dos anos 1980. Os primeiros compressores parafuso utilizados apresentavam um problema crônico de vazamento de fluido refrigerante, que apenas no fim dos anos 1970 foi sanado, por meio da selagem por óleo.

O compressor de parafuso é uma máquina de deslocamento positivo de rotação e constam de dois rotores assimétricos, o macho e a fêmea, conforme podemos ver na Figura 2.13. O rotor macho tem roscas convexas e o rotor fêmeo rosca côncava, um se encaixa no outro e através do acionamento ou giro de um deles, o outro gira também. Entretanto, de acordo com Stoecker (2009), eles não fazem contato entre si, porque se atritam através de um fino filme viscoso de óleo lubrificante que se mantém entre os rotores e a carcaça que os envolve.

Figura 2.13 – Ilustração de um compressor parafuso em corte



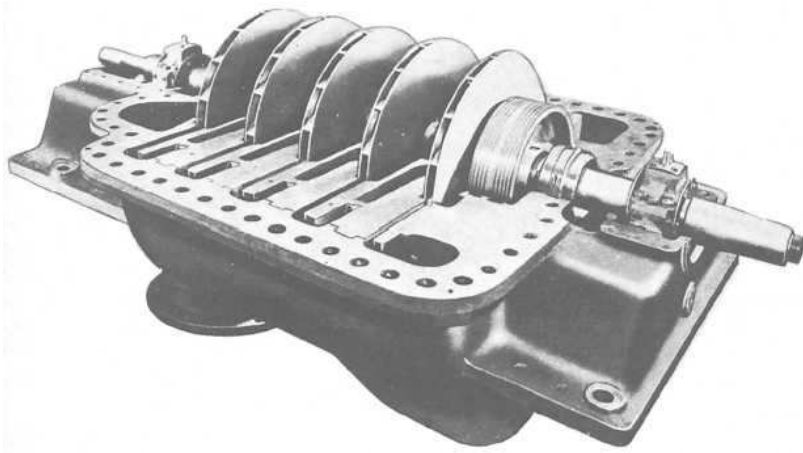
Fonte: Stoecker (2009).

Entre as vantagens dos “chillers” que utilizam compressor parafuso sobre os demais (principalmente os alternativos), temos que ele apresenta menos partes móveis, portanto maior confiabilidade, baixo torque necessário, controle fino de temperatura e um menor nível de ruído. Isso faz com que os compressores de parafuso sejam indicados para uso com todos os refrigerantes comuns (MILLER; MILLER, 2011). Estes compressores também possuem as maiores eficiências dentre todos os “chillers” elétricos. Por causa da simplicidade, versatilidade, durabilidade e confiabilidade, os “chillers” tipo parafuso têm grande aceitação em aplicações de condicionamento de ar, na faixa de capacidade variando de 140TR a 500 TR. Por outro lado, as tecnologias de usinagem disponíveis para seus componentes não permitem o uso destes compressores em “chillers” de capacidades inferiores a 100TR.

O primeiro compressor centrífugo em instalações frigoríficas foi introduzido por Willis Carrier, em 1920. De lá para cá o compressor centrífugo, ilustrado na Figura 2.14, tornou-se o tipo de compressor mais utilizado em grandes instalações (STOECKER, 2009). Eles são comercialmente utilizados em equipamentos de climatização de 300TR até 3000 TR de capacidade. As temperaturas de evaporação alcançadas podem atingir a faixa de -50 a -100°C, em sistemas de múltiplos estágios, embora uma aplicação bastante generalizada do compressor centrífugo seja o resfriamento de água entre 6 e 8°C, em instalações de ar condicionado central. Construtivamente, de acordo

com Miller e Miller (2011), o compressor centrífugo se assemelha bastante com a bomba centrífuga.

Figura 2.14 – Ilustração de um compressor centrífugo em corte



Fonte: Stoecker (2009).

Devido ao fato de apresentarem custo relativamente baixo, bem como elevadas eficiências para aplicações de grande capacidade, os “chillers” centrífugos, são geralmente empregados em aplicações maiores que 400 TR. O ponto negativo é que os compressores centrífugos não são aplicáveis para “chillers” cujas capacidades sejam inferiores a 200TR.

. Almejando calcular as eficiências dos “chillers” elétricos em um momento posterior, foram selecionados um “chiller” alternativo, modelo CGOA100 (TRANE, 1998), um “chiller” equipado com um compressor “scroll”, modelo CGWD050 (TRANE, 2004), um “chiller” parafuso, modelo RTWD250 (TRANE, 2012), e um “chiller” centrífugo modelo CVGF500 (TRANE, 2013). Todos estes equipamentos mencionados possuem condensação a água e os números referentes aos modelos descrevem suas capacidades nominais de climatização. Consultando os catálogos técnicos dos referidos equipamentos, sob as condições preconizadas pela norma AHRI 550/590 (2011), obtém-se as características operacionais, que constam na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características operacionais para os “chillers” elétricos

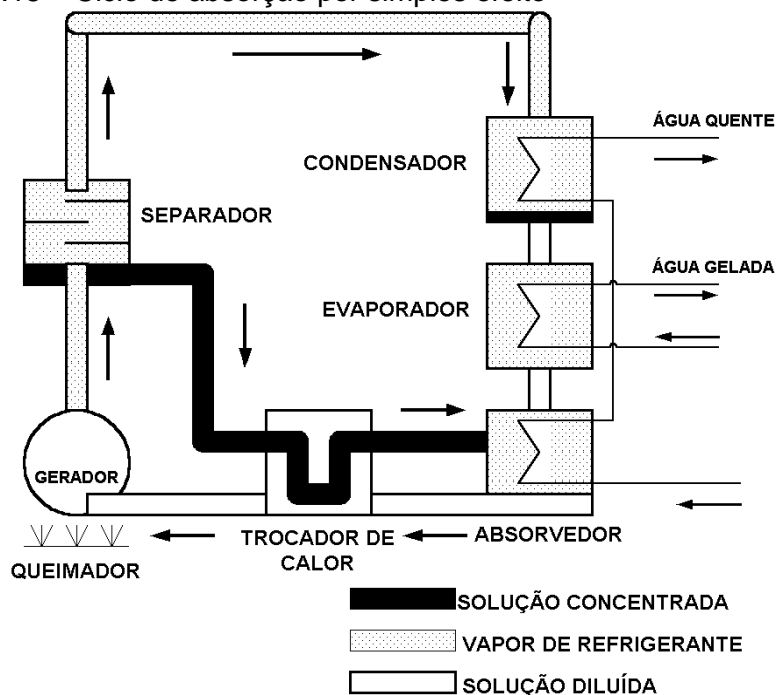
PARÂMETROS OPERACIONAIS	MODELO			
	CGWD050	CGOA100	RTWD250	CVGF500
Vazão de água no evaporador(\dot{q})	7,4 l/s	15,2 l/s	34,98 l/s	77,5 l/s
Temperatura - água na entrada/saída do evaporador(T_E/T_S)	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C
Consumo elétrico - equipamento(\dot{W})	170,4kW	349,9kW	805,3kW	1784,3kW

Fontes: TRANE, (1998), TRANE (2004), TRANE (2012) e TRANE (2013).

2.3.2 “Chillers” movidos a gás natural

Um ciclo de absorção para equipamentos de grandes capacidades, de acordo com Stoecker (2009), opera conforme a Figura 2.15, onde o condensador, a válvula de expansão e o evaporador funcionam de maneira análoga à do ciclo de compressão de vapor. A diferença principal é o processo pelo qual o vapor de baixa pressão oriundo do evaporador tem sua pressão e temperaturas elevadas ao ponto de entrada no condensador. O compressor mecânico é substituído por um arranjo que pode ser informalmente chamado de “compressor térmico”, formado de bomba, gerador, separador, absorvedor e um trocador de calor. O fluido refrigerante irá trabalhar com um fluido auxiliar chamado de absorvente. Os pares de fluidos mais utilizados em equipamentos desta espécie, conforme Villa, Dutra e Guerrero (2012), são brometo de lítio-água (LiBr-H₂O) ou água-amônia (H₂O-NH₃).

Figura 2.15 – Ciclo de absorção por simples efeito



Fonte: Elaboração própria (2013).

O ciclo de refrigeração por absorção é mais antigo que o ciclo por compressão. Seus fundamentos, segundo Araújo (2010) e Sousa (2011), são datados de 1777 e seu criador principal foi William Cullen, por meio de estudos teóricos. Em 1823, surgiu o primeiro protótipo da máquina de absorção, desenvolvido por Ferdinand E. Carré, em Paris. No entanto, apenas em 1929 que os princípios teóricos dos ciclos de refrigeração por absorção para os “chillers” destinados à climatização de estabelecimentos comerciais foram estabelecidos, com a introdução do diagrama de entalpia versus concentração (VILLA; DUTRA; GUERRERO, 2012). O desenvolvimento de sistemas industriais para ar condicionado por absorção ocorreu pela utilização do par cloreto de lítio-água e, mais tarde, brometo de lítio-água. Outras substâncias, citadas por Cortez (1984) no Quadro 2.1, foram também testadas nestes tipos de equipamentos. Empresas como a Carrier e a Servel-Robur fabricaram, durante os anos 40, sistemas com essa tecnologia. Atualmente, de acordo com Herold, Radermacher e Klein (1996), empresas como TRANE®, CARRIER® e YORK® nos EUA, associadas a empresas japonesas, detêm uma alta tecnologia neste setor.

Quadro 2.1 - Pares mais utilizados em sistemas de refrigeração por absorção

Fluido Absorvente	Fluido Refrigerante
Água	Amônia (NH ₃)
Água	Metil amina (CH ₃ NH ₂)
Água	Aminas alifáticas
Solução de brometo de lítio(LiBr)	Água
Solução de cloreto de lítio em metanol	Metanol (CH ₃ OH)
Acido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	Água
Sulfocianeto de amônia (NH ₄ CNS)	Amônia
Nitrato de lítio	Amônia

Fonte: Cortez (1984).

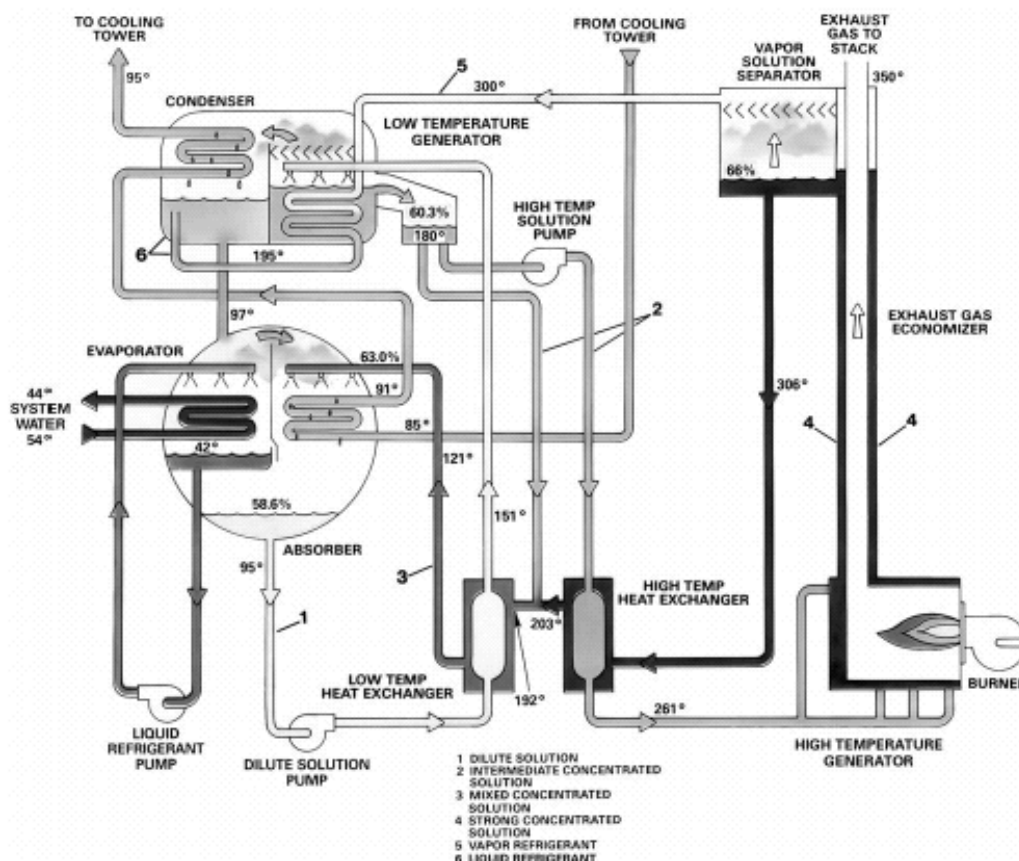
Nos ciclos de refrigeração e climatização por absorção, o aquecimento do gerador pode ser feito indiretamente por meio de água quente ou vapor (steam fired), ou diretamente, por meio da queima de combustível (direct fired). No caso da queima direta, segundo Monteiro e Silva (2010), o gás natural se apresenta como o combustível mais adequado, devido a diversas razões, dentre as quais podem ser citadas:

- a) Facilidade de partida (chama piloto);
- b) Modulação da capacidade;
- c) Combustão pouco poluente, em comparação aos demais combustíveis.

Fazendo uso da fonte de calor disponível, o sistema pode ser classificado em simples efeito, conforme ilustrado na Figura 2.15, ou duplo efeito, mostrado na Figura 2.16, onde a separação é feita em dois níveis, aumentando assim a eficiência. Todos estes sistemas utilizam bombas para a circulação da solução. É importante frisar que a energia consumida por estas bombas é bem inferior à energia consumida por um compressor em uma

instalação convencional. Isto se deve ao fato de que o compressor trabalha sobre o vapor do refrigerante, promovendo simultaneamente compressão e circulação, enquanto as bombas atuam apenas sobre a circulação da solução absorvente-refrigerante (STOECKER, 2009).

Figura 2.16 – Ciclo de absorção por duplo efeito



Fonte: BROAD (2011).

Analisando os prós e contras dos tipos de “chillers” por absorção encontrados no mercado, verificamos que os equipamentos que funcionam conforme ciclo de simples efeito apresentam custos de aquisição geralmente mais baixos, porém com coeficientes de desempenhos pequenos (máximo de 0,8) em relação aos “chillers” de efeito duplo, que apesar de mais caros, tem coeficientes de desempenho que chegam a 1,4 em plena carga e 1,6 em condições de carga parcial (VILLA; DUTRA; GUERRERO, 2012). Por outro lado, os “chillers” que possuem capacidades inferiores a 70TR, e que operam conforme ciclo de duplo efeito, não se encontram no mercado, estando esta faixa restrita aos “chillers” de simples efeito.

Assim como feito no ciclo por compressão, uma eficiência deve ser delimitada. O coeficiente de desempenho de um ciclo de absorção (também chamado de coeficiente de performance ou COP) é definido, conforme Herold, Radermacher e Klein (1996), pela Equação (2.7).

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{ge} + \dot{W}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}} \cdot (h_s - h_e)}{(\dot{m}_{\text{comb}} \cdot \beta \cdot \text{PCI}) + \dot{W}_b} \quad (2.7)$$

Em alguns aspectos a aplicação do termo COP para os sistemas de absorção não é feliz, porque o seu valor é consideravelmente menor que os dos ciclos de compressão de vapor (1,4 contra 3, por exemplo). O valor relativamente baixo do Cop de um ciclo de absorção não deve ser considerado como desvantagem para os ciclos de absorção, pois os coeficientes de eficácia (Cop) dos dois ciclos são definidos de formas distintas. O Cop para ciclo de compressão de vapor é a relação direta entre a taxa de refrigeração e a potência de trabalho fornecida pelo compressor para operar o ciclo. Entretanto, energia na forma de trabalho é usualmente mais valiosa do que energia sob a forma de calor (STOECKER, 2009).

Morosuk e Tsatsaronis (2012) definiram uma relação entre a exergia útil e a exergia de entrada no sistema, dada pela Equação (2.8), como sendo eficiência racional, também chamada de eficiência exergética.

$$\Psi = \frac{\Delta \dot{E}x_{\text{agua}}}{\Delta \dot{E}x_{ge} + \dot{W}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}} \cdot [(h_s - h_e) - T_0 \cdot (s_s - s_e)]}{(\dot{m}_{\text{comb}} \cdot \beta \cdot \text{PCI}) + \dot{W}_b} \quad (2.8)$$

Atualmente, embora o mercado faça uso de forma dominante dos sistemas de condicionamento de ar por compressão, diversos estudos envolvendo sistemas de absorção, puros ou atrelados a sistemas de cogeração, são encontrados, principalmente pelo fato destes sistemas fazerem uso de fontes térmicas com temperaturas relativamente baixas (140°C a 170°C) podendo, portanto fazer uso da energia solar, óleo combustível, calor

proveniente de rejeitos térmicos, vapor de processo e gás natural (SOUSA, 2011).

Objetivando, em um momento posterior, calcular as eficiências destes tipos de equipamentos, foram selecionados “chillers” por absorção condensados a água. Para capacidades nominais na faixa de 50TR, existem no mercado apenas equipamentos que operam conforme ciclo de absorção de simples efeito, logo selecionou-se um “chiller” modelo ACF60-72HR (ROBUR, 2013). Para as capacidades nominais de 100TR, 250TR e 500TR, foram utilizados respectivamente os “chillers” de duplo efeito modelos BZY30, BZY75 e BZY150, todos fabricados pela BROAD (2011). Verificando os catálogos técnicos dos referidos equipamentos, dentro das condições recomendadas pela norma ARI 560 (2000), foi confeccionada a Tabela 2.3, onde constam os parâmetros operacionais dos referidos equipamentos.

Tabela 2.3 - Características operacionais para os “chillers” movidos a gás natural.

PARÂMETROS OPERACIONAIS	MODELO			
	ACF60-72	BZY30	BZY75	BZY150
Vazão de água no evaporador(\dot{q})	7,8 l/s	14,9 l/s	37,5 l/s	75,6 l/s
Temperatura - água na entrada/saída do evaporador(T_E/T_S)	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C	7°C / 12,5°C
Consumo de gás natural - equipamento	26,5m ³ /h	25,4m ³ /h	63,7m ³ /h	128m ³ /h
Consumo elétrico - equipamento(\dot{W})	8,2kW	4,2kW	6,1kW	11,6kW

Fontes: Robur (2013) e Broad (2011).

No próximo capítulo, serão estabelecidos os métodos a serem utilizados visando obter as eficiências dos equipamentos acima supracitados, bem como a comparação destas. Também serão abordados aspectos referentes aos custos operacionais, derivados do consumo energético e, com base nestas informações, realizar-se-á uma análise de viabilidade financeira com base no retorno de investimento.

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos de forma detalhada os métodos e fatores utilizados para efetuar uma comparação técnica e econômica entre os sistemas de climatização elétricos (por compressão) e acionados por meio de gás natural (absorção).

Este trabalho não almeja apenas mostrar as vantagens e desvantagens técnico-econômicas do gás natural como insumo energético em relação à energia elétrica, mas também apontar alternativas visando aumentar a competitividade daquele insumo tanto do ponto de vista técnico como econômico. O modelo atual de alocação do gás natural na cadeia energética para fins de climatização propõe o uso do mesmo no início da cadeia, por meio da sua inserção em usinas termoelétricas, para que depois esta energia seja transmitida e distribuída para os estabelecimentos comerciais onde será efetuada a climatização através de chillers por compressão. Conforme visto no capítulo anterior, este modelo apresenta desvantagens, como quedas sucessivas na eficiência energética decorrente dos processos envolvidos, custos com ociosidades das termoelétricas e sobrecarga nos sistemas atuais de transmissão e distribuição de energia elétrica. Por outro lado, este trabalho propõe um modelo no qual o gás natural aproveitaria toda a infraestrutura de transporte e distribuição existente no mercado, sendo inserido apenas no fim da cadeia, valendo-se para tal de chillers por absorção.

Provendo um caráter mais abrangente a este estudo, estratificaram-se os estabelecimentos comerciais de acordo com a sua demanda de climatização. Assim, torna-se mais fácil avaliar qual o melhor tipo de equipamento do ponto de vista técnico e financeiro para cada faixa. Seguindo este critério, os estabelecimentos comerciais ficaram divididos da seguinte forma:

- a) Estabelecimentos comerciais de pequeno porte, cuja demanda é de 1TR até 50TR. Esta classe é composta de mercadinhos,

- pequenas confecções, armarinhos, lanchonetes, lojas de conveniências, etc;
- b) Estabelecimentos comerciais de médio porte, cuja demanda é de 51TR até 100TR. Esta classe abrange lojas de eletrodomésticos, livrarias, mercados, pequenos centros comerciais, etc;
 - c) Estabelecimentos comerciais de grande porte, cuja demanda é de 101TR até 250TR. Esta classe é constituída de supermercados, lojas de departamentos, centros comerciais medianos, cinemas, etc;
 - d) Estabelecimentos comerciais de porte especial, cuja demanda é de 251TR até 500TR ou maiores. Pertencem a esta classe os hipermercados, grandes centros comerciais, shopping centers, teatros, cinemas multiplex, grandes varejistas e atacadistas.

3.2 COMPARAÇÃO TÉCNICA

Do ponto de vista técnico, a comparação entre os insumos energéticos foi efetuada por meio das eficiências energéticas e exergéticas dos referidos “chillers” que utilizam tais insumos, considerando não apenas os coeficientes de performance destes conforme dados de catálogos técnicos e suas eficiências exergéticas associadas, mas levando-se em conta a inserção destes equipamentos numa cadeia energética que passa pelos processos de geração, transmissão ou transporte e distribuição do insumo energético. Durante as simulações realizadas para determinação das eficiências energéticas e exergéticas associadas aos equipamentos, seus parâmetros funcionais foram determinados através das normas AHRI 550/590 (2011) e ARI 560 (2000), que são destinadas a estabelecer as condições operacionais para verificação de coeficiente de performance de “chillers” por compressão e absorção, e cujos pilares principais são:

- a) Temperatura da água na saída do evaporador entre 2,3°C e 15,6°C;
- b) Redução de temperatura da água ao passar pelo evaporador entre 2,8°C e 11,1°C;

- c) Temperatura da água na entrada do condensador entre 12,8°C e 40,6°C;
- d) Fluxo de água no evaporador entre 0,07l/s e 0,38l/s para cada tonelada de refrigeração ou TR.

Em alguns casos, por questões de inviabilidade técnica, pode-se propor como solução o uso de equipamentos com capacidade superior, operando em carga parcial. Para tal, utiliza-se o coeficiente de performance sob condições parciais de carga (IPLV), que conforme as normas AHRI 550/590 (2011) e ARI 560 (2000), pode ser descrito por meio da Equação (3.1).

$$IPLV = 0,01 * A + 0,42 * B + 0,45 * C + 0,12 * D$$

(3.1)

Na qual A, B, C e D correspondem aos valores dos coeficientes de performance para o equipamento rodando a 100%, 75%, 50% e 25%, respectivamente.

3.2.1 Comparação energética

Todas as comparações energéticas aqui apresentadas foram baseadas em um parâmetro adimensional, que não está atrelado ao equipamento em si, mas a toda a cadeia energética desde o insumo em questão (gás natural), da sua inserção na cadeia até o efeito final desejado, que é a climatização dos estabelecimentos comerciais. Neste caso, para o uso de energia elétrica oriunda de usinas termoelétricas movidas a gás natural, que corresponde ao processo atual, o coeficiente de performance global, descrito na Equação (3.2) é uma função do coeficiente de performance do equipamento, este dado pela Equação (2.13), e da eficiência global da cadeia energética, previamente calculada na Tabela 2.1.

$$COP_g = COP_{ch} * \eta_g$$

(3.2)

Do ponto de vista termodinâmico e energético, o coeficiente de performance (COP), também conhecido como coeficiente de eficácia,

caracteriza o desempenho energético de um ciclo de refrigeração, relacionando o produto desejado, que é a climatização do recinto, com o insumo necessário para produzi-lo, ou seja, a energia consumida. Vale a pena ressaltar que o coeficiente de performance deve ser adimensional, portanto atenção especial quanto às unidades envolvidas deve ser dedicada nesta etapa.

Valendo-se da alternativa proposta por este trabalho, que é a relocação do gás natural para o final da cadeia energética por uso de “chillers” por absorção, o coeficiente de performance global seria igual ao apresentado pelo equipamento e descrito na Equação (2.15), pois não haveriam as perdas decorrentes da cadeia energética atualmente utilizada. Porém, antes de determinar as eficiências energéticas dos equipamentos de absorção, é necessário estabelecer algumas características fundamentais do gás natural a ser utilizado. De acordo com Bahiagás (2013), o gás que é comercializado e consumido no estado da Bahia, região na qual está centrado este estudo, tem as propriedades típicas dadas pelo Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Propriedades do gás natural comercializado no estado da Bahia

PROPRIEDADE	VALOR TÍPICO
Massa específica (ρ)	0,7446 kg/m ³
Poder calorífico superior (PCS)	39300 kJ/ m ³
Poder calorífico inferior (PCI)	35550 kJ/ m ³

Fonte: Bahiagás (2013).

3.2.2 Comparação exérgica

A comparação baseada em parâmetros exérgicos representa uma inserção de características qualitativas ao estudo, no tocante aos fluxos energéticos envolvidos. Se por um lado as análises energéticas baseiam-se em referenciais absolutos, a análise exérgica estabelece um novo referencial sobre o qual são parametrizadas todas as grandezas analisadas. De acordo com Kotas (1995) e Oliveira (2012), para estudos que envolvam exergia termomecânica de fluxo, os valores correspondentes aos referenciais, também chamados de estado morto, englobam os valores de entalpia e entropia

indexados às condições do ambiente externo, ou seja, para este estudo pressão de 101,3kPa e temperatura de 25oC ou 298K.

De maneira análoga ao que foi exposto durante a comparação energética, quando utiliza-se como insumo energético a eletricidade proveniente de usinas termoelétricas a gás, é necessário definir uma eficiência exergética global (Ψ_g), que é uma relação entre os fluxos exergéticos de entrada e saída da cadeia exergética. Portanto, deve-se também aplicar, para os equipamentos elétricos, a eficiência global da cadeia energética sobre as eficiências exergéticas dos referidos equipamentos, de acordo com a Equação (3.3).

$$\Psi_g = \Psi_{ch} * \eta_g$$

(3.3)

Quando é realizada a relocação do ponto de uso do gás natural nesta cadeia, aplicando este no fim da mesma, por meio de “chillers” de absorção, as perdas decorrentes da cadeia energética automaticamente deixam de existir, e a eficiência global do ciclo corresponde à eficiência exergética do “chiller” por absorção, conforme a Equação (2.16).

Entretanto, a definição da eficiência exergética relativa à combustão do gás natural passa pelo cálculo do fator β , que relaciona a exergia química de combustão e o poder calorífico de um combustível. Este fator, para combustíveis hidrocarbonetos gasosos, segundo Szargut, Morris e Steward (1986), é função da composição química deste. Como o gás natural é resultado da combinação de hidrocarbonetos gasosos conforme composição mostrada na Tabela 3.2, efetuar-se-á uma média ponderada dos fatores para cada um dos hidrocarbonetos que compõem o gás, em função de seus percentuais volumétricos. A Equação (3.4) expressa o cálculo do fator β em função dos componentes do gás natural a ser utilizado como insumo energético.

$$\beta = (\%_{CH_4} * \beta_{CH_4}) + (\%_{C_2H_6} * \beta_{C_2H_6}) + (\%_{C_3H_8} * \beta_{C_3H_8})$$

(3.4)

Os fatores β_{CH_4} , $\beta_{\text{C}_2\text{H}_6}$ e $\beta_{\text{C}_3\text{H}_8}$ são calculados separadamente, por meio da Equação (2.7), inserindo nesta as composições moleculares em função da quantidade de átomos de hidrogênio e carbono presentes na molécula, respectivamente.

Tabela 3.1 - Composição do gás natural comercializado no estado da Bahia

COMPONENTE	% volume
Metano (CH ₄)	88,82
Etano (C ₂ H ₆)	8,41
Propano (C ₃ H ₈)	0,55
Nitrogênio (N ₂)	1,62
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,6

Fonte: Bahiagás (2013).

Devido ao fato de serem componentes do gás, porém inertes durante a combustão, o nitrogênio e o dióxido de carbono não possuem exergia de combustão, pois eles são computados tanto do lado dos reagentes como do lado dos produtos na reação química de queima do gás natural.

Efetuando-se separadamente os cálculos dos coeficientes β para cada um dos hidrocarbonetos que compõem o gás natural, através da Equação (2.7), e depois fazendo a média ponderada utilizando a Equação (3.4), foi confeccionada a Tabela 3.2, onde consta, como resultado, o valor do coeficiente β para o gás natural comercializado na Bahia.

Tabela 3.2 - Fator β para o gás natural comercializado no estado da Bahia

COMPONENTE	Valor de β
Metano(CH ₄)	1,0206
Etano(C ₂ H ₆)	1,0279
Propano(C ₃ H ₈)	1,0316
Nitrogênio(N ₂)	0
Dióxido de carbono(CO ₂)	0
GÁS NATURAL	0,9986

Fonte: Elaboração própria (2013).

Por meio do emprego do valor da relação entre o poder calorífico inferior e a exergia química de combustão, mantendo-se as mesmas unidades de medida para todas as grandezas mensuradas, é possível comparar as

eficiências exergéticas referentes aos equipamentos elétricos e por absorção acionados a gás natural de forma adimensional. Esta pode, então, ser considerada uma forma direta e imparcial de comparação entre as duas cadeias energéticas propostas.

3.3 COMPARAÇÃO ECONÔMICA

Quando findadas todas as análises dentro de um âmbito técnico, efetuar-se-á uma análise e comparação econômica entre os sistemas, baseada no custo operacional que por sua vez é decorrente do consumo dos insumos energéticos e, em um momento posterior, confrontando esses dados com os custos de aquisição dos equipamentos, resulta-se em um estudo de viabilidade financeira para os portes de estabelecimentos comerciais aqui propostos.

3.3.1 Comparação com base nos custos operacionais

Toda e qualquer comparação econômica indubitavelmente tem que levar em conta os custos operacionais. Neste horizonte de levantamento financeiro, de acordo com Módenes et al. (2012) e Shekarchian et al. (2011), é obrigatório levar em consideração os custos devido ao consumo de insumos energéticos, tipos de insumos envolvidos, tarifas diferenciadas devido ao uso e, finalmente, os custos decorrentes da utilização destes.

Os “chillers”, que fazem uso da energia elétrica produzida no Brasil, assim como os demais equipamentos utilizados em lojas, shopping centers, mercados padarias, etc..., são pertinentes ao grupo de estabelecimentos comerciais, portanto, para o estado da Bahia que pertence à região utilizada como base neste estudo, tem suas tarifas e respectivos preços de eletricidade regidos conforme estabelecido pela Aneel e seguidas pela concessionária estadual de energia (COELBA, 2013) para o uso comercial conforme dados coletados na Tabela 3.3, baseada em valores decorrentes da resolução Aneel número 1511 de 16 de abril de 2013. Esses valores de preço (ANEXO A) serão considerados em todo estudo, no pertinente aos custos de energia

elétrica a serem praticados em um estudo visando à imediata inserção do gás natural como insumo energético para aplicações comerciais de climatização.

Tabela 3.3 - Preços de energia elétrica para o setor comercial(ICMS=27%,PIS/COFINS=4,4%)

Classe A3a - COMERCIAL	Tarifa (R\$/kWh)	Preço (R\$/kWh)
Tarifa do kWh(FP) – FP	0,1309	0,1908
Tarifa do kWh (NP)– NP	1,0257	1,4951

Fonte: Coelba (2013).

Como as tarifas e preços acima listados estabelecem uma diferenciação entre consumo energético no horário de ponta e fora deste, também devem ser dadas as devidas relevâncias aos custos operacionais dos referentes equipamentos para estas diferentes condições tarifárias. Baseados em dados de Almeida, Torres e Santos (2003), que definem como condições usuais de instalações comerciais o funcionamento destas em 24 dias por mês, nos quais 15 horas divididas em 12 horas fora do horário de ponta e 3 horas em horário de ponta. O período de 24 dias por mês é definido, de uma forma generalizada, e conforme com a Equação (3.5) o custo operacional devido ao insumo energético para um equipamento ou “chiller” elétrico como sendo, conforme Módenes et al. (2012), função do consumo deste equipamento, horas de funcionamento dentro e fora do horário de ponta e a quantidade de dias em regime de operação por mês.

$$S_{el/mes} = \left(\frac{W_C(RW)}{Q_L(TR)} \right) * \left(\frac{dias}{mes} \right) * \left[\left(\frac{R_{\$-FP}}{kWh} * \frac{h_{FP}}{dia} \right) + \left(\frac{R_{\$-NP}}{kWh} * \frac{h_{NP}}{dia} \right) \right] \quad (3.5)$$

É importante frisar que a Equação (3.5) determinará os custos operacionais mensais decorrentes do uso de um “chiller” elétrico para cada TR de climatização fornecida por este. Fazendo uso deste artifício, compara-se não só equipamentos de mesma capacidade, como também são realizados estudos comparativos para “chillers” de faixas distintas.

Entretanto, quando requer-se determinar qual a melhor alternativa de inserção do gás natural na cadeia energética, deve-se levar em conta que as

comparações fundamentadas em tarifas de eletricidade atuais são fruto de uma matriz energética onde 88% da energia é oriunda de usinas hidrelétricas e 9% provém das termelétricas (MME, 2012b). A Tabela 3.4 (WWF, 2012) provê um comparativo dos custos referentes à geração de eletricidade no Brasil, onde é possível verificar que a energia produzida pelas usinas termelétricas (UTES) é, no mínimo, 71% mais cara do que a obtida através de usinas hidrelétricas (ROSA, 2007).

Tabela 3.4 - Comparação entre os custos da energia produzida conforme a natureza da usina

TIPO DE USINA	Custo da energia (R\$/MWh)	
	Mínimo	Máximo
Usina Hidrelétrica	60,63	101,35
Usina Eólica	89,00	118,00
Usina Termoelétrica a Gás natural	173,58	

Fonte: WWF (2012).

Portanto, pode-se chegar à conclusão de que o uso das termelétricas incrementa o preço da energia elétrica em todo o Brasil, e este aumento por sua vez provoca repasse aos preços de produtos finais, contribuindo, segundo Rosa (2007), para a inflação como um todo. Entretanto, a expectativa para os próximos leilões de geração da energia elétrica, previstos para fim deste ano (MME, 2013), é que a diferença entre os custos da energia gerada pelas termelétricas e a energia gerada pelas hidrelétricas seja reduzido a um patamar próximo de 20%, podendo chegar a desaparecer, caso a proprietária da usina termelétrica seja também dona do gás natural. Mesmo assim, em virtude dos empreendimentos já construídos, é impossível que aos preços da eletricidade proveniente das termoelétricas movidas a gás natural se equipare à produzida pelas usinas hidrelétricas. Logo, a diversificação dos insumos energéticos para fins comerciais proposta neste trabalho terá mais um efeito benéfico à sociedade, que é não contribuir para o aumento dos preços de eletricidade.

Para os equipamentos acionados diretamente pelo gás natural, as tarifas e preços para o estado da Bahia são determinadas pela Agerba e obedecidas pela concessionária de gás natural do estado, a Bahiagás (2013b). Para aplicações comerciais, a resolução número 02, de 01 de abril de 2013 estabelece os valores tarifários conforme dados da Tabela 3.5, na qual o valor do preço é função do consumo mensal de gás natural por parte do estabelecimento. A tabela completa de preços consta do ANEXO B.

Tabela 3.5 - Preços do gás natural para o setor comercial do estado da Bahia

Classe 3 - COMERCIAL	Tarifa(R\$/m³) sem impostos	Tarifa(R\$/m³) com impostos
Consumo de 1 a 450 m ³ /mês	2,0099	2,5523
Consumo de 451 a 1500 m ³ /mês	1,1595	1,4724
Consumo de 1501 a 4500 m ³ /mês	1,0875	1,3810
Consumo de 4501 a 15000 m ³ /mês	1,0285	1,3070
Consumo de 15001 a 30000 m ³ /mês	1,0269	1,3040
Consumo de 30001 a 180000 m ³ /mês	0,9981	1,2674

Fonte: Bahiagás (2013b).

Analisando previamente a estrutura dos preços, verifica-se que o valor desta apresenta um comportamento progressivo, sendo reduzida drasticamente com o aumento do consumo, ou seja, favorecendo os grandes consumidores. Observa-se também que não existe diferenciação entre horário de ponta ou fora deste, o que constitui uma vantagem deste insumo em relação à energia elétrica. Como consequência também desta constância tarifária ao longo de um dia de consumo, a expressão para cálculo dos custos operacionais destes “chillers” movidos a gás natural, descrita pela Equação (3.6), apresenta duas componentes distintas. Uma, de caráter preponderante, se refere ao custo decorrente do consumo de gás natural, enquanto a outra, de menor ordem, está ligada ao pequeno consumo de energia elétrica requerido pelas bombas de circulação do par absorvente/refrigerante(W_b).

$$\$_{GN/mês} = \left[\left(\frac{\dot{m}}{Q_{L(TR)}} \right) * (\$_{GN}) \right] + \left\{ \left(\frac{W_b(KW)}{Q_{L(TR)}} \right) * \left(\frac{dias}{mês} \right) * \left[\left(\frac{\$_{RS-FP}}{KWh} * \frac{h_{FP}}{dia} \right) + \left(\frac{\$_{RS-NF}}{KWh} * \frac{h_{NF}}{dia} \right) \right] \right\} \quad (3.6)$$

É importante frisar que, como este trabalho almeja efetuar uma comparação imparcial entre “chillers” que operam conforme insumos energéticos distintos, é mandatório submeter estes às mesmas condições operacionais, ou seja, 15 horas de funcionamento por dia durante 24 dias por mês. Outro aspecto relevante é o fato de que as tabelas tarifárias classificam as faixas de consumo de acordo com o consumo mensal de gás natural, ou seja, metros cúbicos por mês. Os dados coletados pelos equipamentos estão em metros cúbicos por hora, logo uma conversão de unidades é importante para classificar a faixa de consumo dos equipamentos, simplificar a Equação (3.6) e fornecer dados compatíveis com as análises de viabilidade a serem conduzidas em um momento posterior. Aplicando-se os fatores referentes às condições operacionais acima supracitadas para converter o consumo de gás natural dos “chillers”, obtém-se a Tabela 3.6, contendo os valores de consumo para cada “chiller” a ser utilizado neste estudo.

Tabela 3.6 - Consumo de “chillers” a gás natural em metros cúbicos por mês

CAPACIDADE DO “CHILLER”	Consumo de GN(m ³ /mês)
“chiller” de 50 T.R., modelo ACF60-72HR	9540
“chiller” de 100 T.R., modelo BZY30	9144
“chiller” de 250 T.R., modelo BZY75	22824
“chiller” de 250 T.R., modelo BZY150	45720

Fonte: ROBUR (2013) e BROAD (2011).

3.3.2 Estudo de viabilidade econômica

De nada adianta mostrar que um empreendimento seja viável tecnicamente se o mesmo não apresenta viabilidade econômica. Boas ideias surgem a cada momento pelo mundo afora, porém algumas destas nunca serão postas em prática, pois não existem subsídios financeiros suficientes

para que sejam difundidas no mercado. Partindo deste pressuposto, é fundamental que todo trabalho anteriormente apresentado seja confirmado ou negado por um estudo de viabilidade econômica, que além de atestar se um empreendimento pode ou não ser apresentado como alternativa, ainda apresenta as barreiras que impedem seu emprego no mercado, ou mostrar as soluções necessárias para que a ideia possa seguir adiante quanto ao uso no cotidiano.

Uma das etapas mais importantes na elaboração de um projeto é a análise da viabilidade econômica e financeira. Definidos os equipamentos, é necessário considerar diversos fatores com o objetivo de realizar um estudo preliminar sobre a viabilidade inicial do projeto. Esses fatores, de acordo com Arouca, Almeida e Torres (2012), são constituídos pelo desempenho do equipamento ou sistema, durabilidade, manutenção, aspectos ergonômicos e principalmente o consumo de energia, que constitui o foco principal deste trabalho.

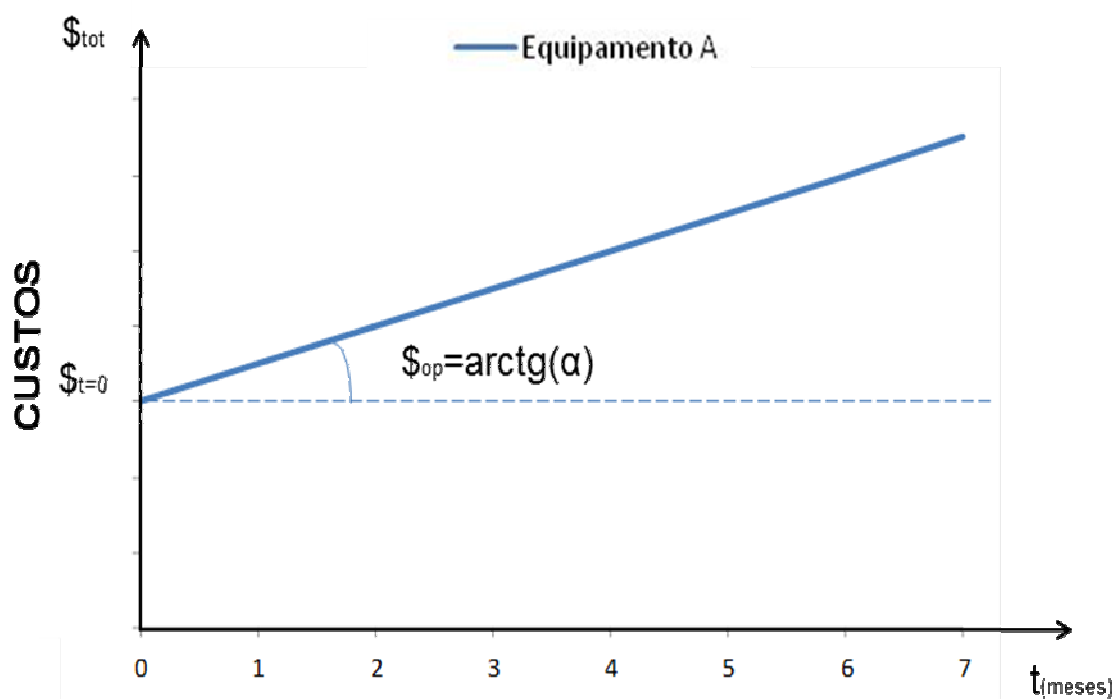
O método de análise da viabilidade econômica será o método do período de retorno do capital (“payback”), ou seja, calculando o prazo necessário para que o valor atual dos reembolsos (retorno de capital) se iguale ao desembolso com o investimento efetuado, visando à restituição do capital aplicado.

De acordo com o método do período de retorno do capital, para que sejam precisamente analisados os efeitos de uma determinada aplicação, investimento ou empreendimento, aplica-se o conceito de custo total para um empreendimento, que pode ser definido em função dos custos iniciais de aquisição de equipamentos, e da parcela referente aos custos operacionais ao longo do tempo. A Equação (3.7) expressa matematicamente o conceito de custo total. Como este trabalho faz uma comparação entre dois empreendimentos (“chillers”) que têm como alvo a mesma classe de estabelecimentos comerciais, convém não levar em consideração os recebimentos ou retornos de capital decorrentes, pois estes seriam aplicáveis a ambos os equipamentos em questão, logo seriam cancelados em qualquer equacionamento decorrente desta comparação.

$$\$_{\text{tot}} = \$_{t=0} + (\$_{\text{op}} * t) \quad (3.7)$$

Na equação (3.7), o tempo pode ser determinado em horas, dias, meses ou anos. Porém, por uma questão de coerência dimensional, recomenda-se que o tempo tenha as mesmas unidades utilizadas nos custos operacionais. Quando são empregados os valores numéricos referentes aos custos, pode se concluir que estes poderiam ser vislumbrados sob a forma do Gráfico 3.1, onde são facilmente identificados todos os fatores contidos na Equação (3.7).

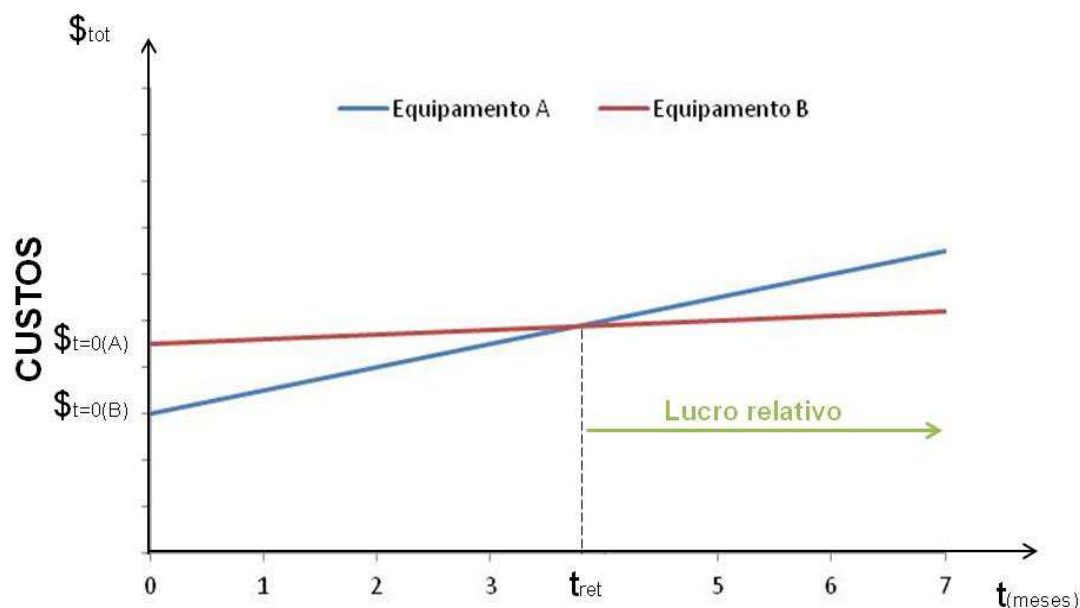
Gráfico 3.1 – Custos de um investimento



Fonte: Ross e Westerfield (2013).

Quando são confrontados dois investimentos, e conseqüentemente almeja-se determinar qual destes apresenta-se mais vantajoso a curto, médio e longo prazo, obtém-se a configuração mostrada no Gráfico 3.2, onde um segundo investimento pode ter maiores custos iniciais referentes a aquisição de equipamentos, porém, por outro lado apresentar custos operacionais reduzidos, o que traria um retorno do investimento a médio ou longo prazo, em comparação ao primeiro investimento estabelecido.

Gráfico 3.2 – Comparação entre dois investimentos



Fonte: Ross e Westerfield, (2013).

Uma análise algébrica das informações contidas no Gráfico 3.2 pode fornecer as expressões necessárias para o cálculo preciso das grandezas desejadas. A principal destas seria o tempo de retorno, que corresponde à igualdade de custos provenientes dos investimentos referentes aos equipamentos a serem comparados, conforme a relação estabelecida na Equação (3.8).

$$\$_{tot(A)} = \$_{tot(B)} \quad (3.8)$$

Como este trabalho tem como um dos objetivos estudar a viabilidade financeira de “chillers” que opera conforme ciclo de absorção, acionados por gás natural, perante os similares que utilizam energia elétrica como insumo energético, serão empregados valores correspondentes aos custos iniciais e operacionais destes. Especial atenção deve ser empregada no tocante aos custos iniciais, que devem ser expressos em reais por tonelada de refrigeração (R\$/T.R.), com o propósito de uniformizar as unidades de medida com os custos operacionais, e também eliminar as pequenas diferenças de capacidade entre os equipamentos destinados a uma determinada faixa do setor comercial estabelecida no começo deste capítulo. Substituindo as variáveis das Equações (3.7) e (3.8) por aquelas referentes ao estudo em questão, obtém-se,

por meio da Equação (3.9), a expressão utilizada para o cálculo do tempo de retorno em meses, para um eventual uso de “chillers” a gás natural.

$$t_{\text{ret}} = \frac{(\$_{t=0,\text{GN}} - \$_{t=0,\text{el}})}{(\$_{\text{op,el}} - \$_{\text{op,GN}})} \quad (3.9)$$

Dentro do âmbito da Equação (3.9), é requerido estabelecer alguns limites para o tempo de retorno de forma que este venha prover atratividade ao uso de “chillers” acionados por gás natural, em detrimento dos equipamentos elétricos. Primeiramente, o tempo de retorno não pode apresentar valores negativos, o que significaria que os chillers a gás natural teriam custos de aquisição menores que os elétricos, para uma mesma faixa de capacidade, o que certamente não existe no mercado de “chillers”. Outra possibilidade que pode tornar negativo o tempo de retorno seria o fato dos custos operacionais do gás natural superarem os custos operacionais decorrentes do uso de energia elétrica, o que causaria um comportamento divergente no Gráfico 3.2.

Ainda no que concerne ao tempo de retorno, a instrução normativa número 162 da Receita Federal (SRF, 1998) estabelece para o item de referência 8418, conforme nomenclatura comum do Mercosul, que abrange as máquinas para produção de frio e centrais de condicionamento de ar, um prazo de vida útil correspondente a 10 anos ou 120 meses. A instrução normativa, assim como os seus detalhes encontram-se no ANEXO C. Conseqüentemente, um investimento cujo tempo de retorno ultrapasse este limite tornar-se-á inviável. Por outro lado, esta informação de tempo de retorno limite permite estabelecer, para os casos em que porventura o tempo de retorno ultrapasse os 120 meses, a tarifa máxima de gás natural de forma a viabilizar o investimento dentro do limite deste prazo. A Equação (3.10) é utilizada para determinar este valor máximo da tarifa (tarifa máxima viável), na eventualidade dos investimentos cujo tempo ultrapasse os 120 meses.

$$\$_{\text{max,GN}} = \frac{(\$_{t=0,\text{el}} - \$_{t=0,\text{GN}})}{120} + \$_{\text{op,el}} \quad (3.10)$$

Para facilitar as análises, bem como fornecer todas as tabelas e gráficos que irão ilustrar as simulações e comparações, foi dedicada uma especial atenção aos seguintes critérios:

- a) Levantamentos de custos nos quais os custos operacionais decorrentes do uso de gás natural sejam maiores do que aqueles praticados consumindo eletricidade. Neste caso, recomenda-se proceder com simulações adicionais, de forma a determinar o preço ideal do gás natural que promova equilíbrio entre os custos operacionais. Estes valores servem como referência para as análises do tempo de retorno;
- b) Estudos nos quais é alcançado o tempo de retorno dentro do prazo máximo de 120 meses e utilizando as tarifas de gás natural presentes na Tabela 3.4. Estes investimentos são considerados perfeitamente viáveis, sem precisar lançar mão de análises posteriores;
- c) Simulações nas quais o tempo de retorno ultrapasse o valor máximo de 120 meses, porém a tarifa máxima calculada posteriormente consta na categoria 4 referente ao uso em cogeração, conforme Bahiagás (2013b) (ANEXO B). Neste caso, o investimento é considerado viável, porém necessitando revisar todas as tarifas para a categoria 3, de forma a manter a linearidade;
- d) Análises nas quais o tempo de retorno ultrapassa o valor máximo de 120 meses, e a tarifa máxima calculada posteriormente não consta em nenhuma categoria pertinente a tabela tarifária da Bahiagás (2013b). Neste caso, o investimento é considerado pouco viável, necessitando revisar toda a estrutura tarifária, propondo alternativas de preço para o gás natural.

4 SIMULAÇÕES, COMPARAÇÕES E ANÁLISES

4.1 INTRODUÇÃO

Estabelecidas as bases bibliográficas que provisionaram todo arcabouço teórico deste trabalho, bem como os métodos e equações a serem utilizadas, serão aqui apresentadas as simulações para utilização dos equipamentos propostos para as faixas de estabelecimentos comerciais pré-estabelecidas (50TR, 100TR, 250TR e 500TR). Essas simulações, listadas no APÊNDICE A, proverão os valores das eficiências energéticas e exergéticas, bases da comparação técnica. Em um momento posterior, por meio da inserção dos componentes tarifários para energia elétrica e gás natural, será efetuada uma comparação de cunho econômico para serem obtidos os custos operacionais dos “chillers” determinados. Esta comparação baseada nos custos operacionais e de aquisição dos “chillers” serve de base para um estudo de viabilidade financeira relativa ao tempo de retorno do investimento, sempre efetuado comparando-se os equipamentos acionados a gás natural com os equipamentos elétricos que são atualmente utilizados para aplicações comerciais. Como fruto da análise dos dados oriundos das comparações, serão propostas alternativas técnicas e/ou econômicas visando sempre tornar viável a utilização do gás natural na climatização comercial, por meio de “chillers” que operam conforme ciclo de absorção.

4.2 SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES TÉCNICAS

As simulações técnicas, fundamentadas no coeficiente de performance global (COP_g) e eficiência exergética global (Ψ_g), foram efetuadas com base nos dados oriundos dos catálogos técnicos dos referidos equipamentos, porém com os parâmetros operacionais destes conforme as normas AHRI 550/590 (2011) e ARI 560 (2000).

4.2.1 Comparações energéticas

Realizando as simulações referentes aos cálculos dos coeficientes de performance para os “chillers” elétricos e a gás natural, fundamentadas nas Equações (2.5) e (2.7), foram obtidos os valores da Tabela 4.1, da qual além dos coeficientes de performance globais, constam a diferença percentual entre os equipamentos de mesma faixa, com base nos “chillers” elétricos. Portanto uma variação percentual positiva significa uma vantagem dos equipamentos acionados por meio do gás natural.

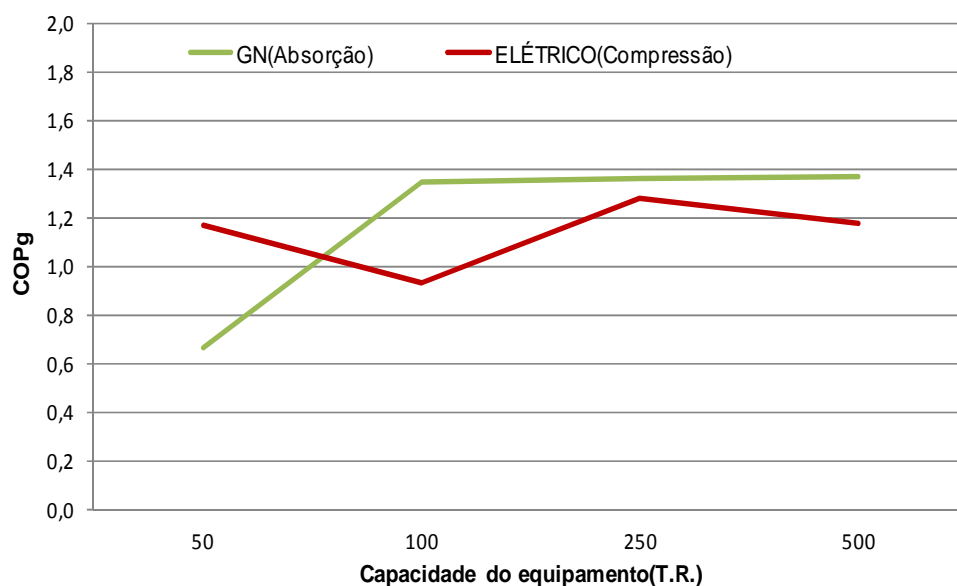
Tabela 4.1 - Coeficiente de performance global para os “chillers” utilizados

CAPACIDADE	COP_g (Elétrico)	COP_g (GN)	VARIAÇÃO (%)
“Chiller” de 50 TR	1,165	0,665	-42,90
“Chiller” de 100 TR	0,928	1,345	44,88
“Chiller” de 250 TR	1,282	1,359	6,07
“Chiller” de 500 TR	1,175	1,364	16,17

Fonte: Elaboração própria (2013).

Os dados da Tabela 4.1 podem ser melhor vislumbrados por meio do Gráfico 4.1, no qual além das diferenças entre os chillers elétricos e a gás natural, pode-se também observar o comportamento do coeficiente de performance global com a mudança da capacidade do equipamento utilizando o mesmo insumo energético.

Gráfico 4.1 – Comparação energética



Fonte: Elaboração própria (2013).

Analisando os dados provenientes do Gráfico 4.1, pode-se ver que, para os “chillers” elétricos, a faixa de 100TR é a que apresenta menor coeficiente de performance, pois esta é suprida pelos equipamentos que utilizam compressores alternativos, que são equipamentos cujo design apresenta-se defasado. Como alternativa para esta baixa eficiência dos “chillers” alternativos, o mercado apresenta atualmente os “chillers” que utilizam compressores “scroll” ou parafuso, porém, como os “chillers” alternativos aqui selecionados são oriundos principalmente dos países do sudeste asiático, estes apresentam-se com custos bastante reduzidos (são cerca de 30% mais baratos), o que inibe o uso de suas alternativas mais eficientes no mercado. Por outro lado, pode ser visto que os “chillers” que utilizam compressores parafuso são os que apresentam melhores eficiências, porém estes têm seu uso restrito à faixa de aplicação de 150TR a 350TR.

Observando-se as performances apresentadas pelos “chillers” por absorção, verifica-se, no Gráfico 4.1, um significativo aumento no coeficiente de performance desses equipamentos quando a capacidade aumenta de 50TR para 100TR. Este aumento se dá por meio da tecnologia empregada para esses “chillers”. Os equipamentos de 50TR disponíveis no mercado fazem uso de ciclos de absorção de simples efeito, enquanto os “chillers” de 100TR e acima, se valem da tecnologia de duplo efeito, na qual aquecimento da solução é feito em dois níveis, e assim, o coeficiente de performance sofre um

incremento maior que 100%. Isto também pode ser visto na Tabela 4.1, onde é constatada a enorme desvantagem competitiva dos “chillers” por absorção da faixa referente a 50TR em relação aos similares elétricos, o que torna os “chillers” de absorção por simples efeito tecnicamente inviáveis para aplicações de cunho comercial valendo-se da queima direta de gás natural.

Como este trabalho almeja apresentar alternativas viáveis aos “chillers” elétricos do ponto de vista técnico e econômico, alternativas devem ser apresentadas de forma a eliminar a defasagem apresentada na faixa de 50TR para os equipamentos acionados a gás natural. Dentre todas as alternativas, a que apresenta melhor aplicabilidade seria o uso de “chillers” de duplo efeito com capacidade superior, porém operando em carga ou regime parcial (IPLV), pois todas as outras opções disponíveis no mercado para “chillers” de absorção cuja capacidade seja 50TR são de equipamentos que operam conforme ciclo de absorção de simples efeito, possuindo valores do coeficiente de performance similares ao equipamento até então utilizado. A Tabela 4.2 ilustra uma comparação entre os coeficientes de performance para a faixa de aplicação referente a 50TR, substituindo o equipamento de simples efeito operando a 100% de sua capacidade por um equipamento de duplo efeito, funcionando a cerca de 50% da sua capacidade nominal de 100TR.

Tabela 4.2 - COP global proposto para aplicações de 50TR

CAPACIDADE	COP_g (Elétrico)	COP_g (GN) IPLV	VARIAÇÃO (%)
“Chiller” de 100 TR	1,165	1,291	10,8

Fonte: Elaboração própria (2013).

Através da modificação proposta, ilustrada na Tabela 4.2, obtém-se uma condição competitiva para os “chillers” de absorção perante seus equivalentes elétricos. Conseqüentemente, esta é a configuração a ser utilizada durante as comparações e análises posteriores, ressaltando o fato de que, no estudo de viabilidade econômica serão analisadas as duas alternativas para equipamentos que operam conforme ciclo de absorção e acionados a gás natural, pois a mudança de equipamentos irá promover alterações nos custos iniciais de aquisição dos mesmos.

4.2.2 Comparações exergeticas

Findadas as análises técnicas de cunho energético, foram efetuadas as análises de cunho exergetico, nas quais são avaliados aspectos qualitativos referentes aos processos de conversão energéticas inerentes aos processos de climatização. Valendo-se das Equações (2.6) e (2.8), tem-se os valores das eficiências exergeticas globais (Ψ_g) para cada equipamento, contidos na Tabela 4.3, bem como a diferença percentual entre os equipamentos movidos a gás natural e seus equivalentes elétricos.

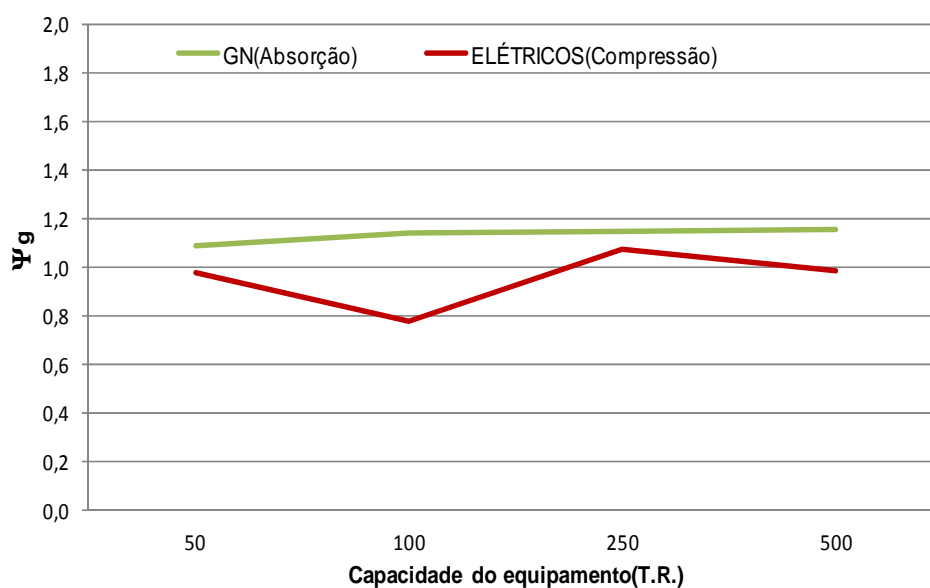
Tabela 4.3 - Eficiência exergetica global para os “chillers” utilizados

CAPACIDADE	Ψ_g (Elétrico)	Ψ_g (GN)	VARIAÇÃO (%)
“Chiller” de 50 TR	0,977	1,093(IPLV)	11,87
“Chiller” de 100 TR	0,778	1,139	46,32
“Chiller” de 250 TR	1,074	1,151	7,13
“Chiller” de 500 TR	0,984	1,155	17,33

Fonte: Elaboração própria (2013)..

Objetivando uma melhor visualização dos dados referentes às eficiências exergeticas, os dados contidos na Tabela 4.3 foram plotados no Gráfico 4.2. Isto permite verificar também o comportamento da eficiência exergetica para o mesmo tipo de insumo energético.

Gráfico 4.2 – Comparação exergética



Fonte: Elaboração própria (2013).

Os valores apresentados na Tabela 4.3 e no Gráfico 4.2 mostram que um incremento da competitividade do ponto de vista exergético, ou seja, a diferença entre os “chillers” a gás natural e os equivalentes elétricos aumentou. Isto confirma o aumento da competitividade exergética observado por Almeida, Torres e Santos (2003), que explicaram esta melhora em função do processo de conversão energética realizado por cada tipo de “chiller”, nos quais os equipamentos elétricos convertem eletricidade em calor a ser retirado no recinto durante a climatização, enquanto os “chillers” a gás natural convertem duas formas energéticas similares, ou seja, calor oriundo da queima do combustível em calor a ser subtraído do recinto a ser climatizado. O processo decorrente da cadeia energética atual para uso do gás natural converte calor da queima do combustível em energia elétrica, que é submetida a outros processos nos quais sofre perdas para depois ter seu teor qualitativo do ponto de vista energético reduzido em uma conversão nos “chillers”. Portanto existem duas conversões entre formas energéticas distintas (calor-eletricidade), além das perdas em sistemas de transmissão e distribuição. O processo proposto neste trabalho consiste em promover conversões energéticas entre duas formas idênticas de energia (calor-calor) e eliminar as perdas decorrentes do transporte energético. Por isto, aplicando os conceitos de exergia que são a base da racionalização energética, e que analisam também a qualidade dos

fluxos energéticos utilizados, a utilização direta de gás natural nos “chillers” por absorção apresenta-se ainda mais vantajosa com relação ao processo atual de uso do gás em usinas termoelétricas.

4.3 SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES ECONÔMICAS

Concluídos todos os estudos e comparações técnicas, bem como efetuando-se as modificações propostas por estes estudos de forma a garantir maior competitividade técnica do gás natural, pode-se então dar prosseguimento aos estudos e comparações econômicas, visando verificar a competitividade financeira do gás natural em relação à energia elétrica como insumo energético para fins de climatização comercial. Caso esta competitividade não seja confirmada, alternativas tarifárias serão propostas de forma a prover atratividade ao uso de gás natural em “chillers” comerciais. As ferramentas utilizadas para tal finalidade são o levantamento de custos operacionais ($\$_{op}$) e o estudo de viabilidade econômica fundamentado no tempo de retorno de investimento, também conhecido como “payback”.

4.3.1 Comparações baseadas nos custos operacionais

Efetuando as simulações econômicas, com base nas Equações (3.5) e (3.6), obtiveram-se os valores da Tabela 4.4, na qual além dos custos operacionais ($\$_{op}$) para os referidos equipamentos em R\$/mês*TR, estão também as diferenças percentuais entre os “chillers” propostos acionados diretamente a gás natural e seus equivalentes elétricos.

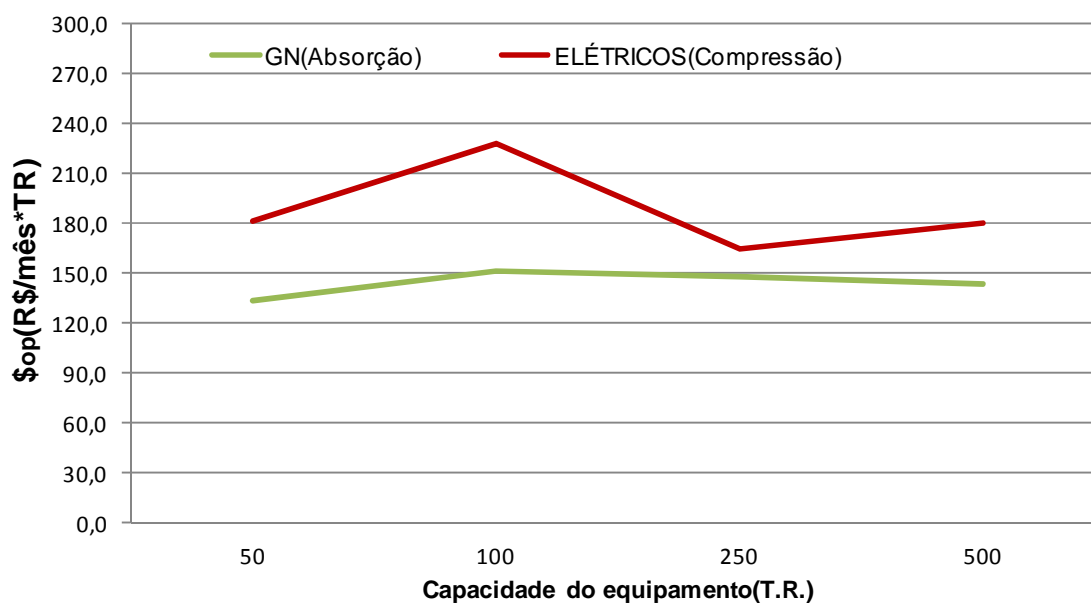
Tabela 4.4 - Custos operacionais para os “chillers” utilizados

CAPACIDADE	$\\$_{op}$ (Elétrico) (R\$/mês*TR)	$\\$_{op}$ (GN) (R\$/mês*TR)	VARIAÇÃO (%)
“Chiller” de 50 TR	181,6	133,7(IPLV)	-23,37
“Chiller” de 100 TR	228,1	151,8	-33,43
“Chiller” de 250 TR	165,2	148,6	-10,03
“Chiller” de 500 TR	180,2	143,9	-20,16

Fonte: Elaboração própria (2013).

As informações contidas na Tabela 4.4 foram plotadas no Gráfico 4.3, no qual pode ser visualizado de uma forma mais clara o comportamento dos custos operacionais com a variação da capacidade dos “chillers” utilizados neste trabalho.

Gráfico 4.3 – Comparação econômica baseada nos custos operacionais



Fonte: Elaboração própria (2013).

Pode-se ver, através do Gráfico 4.3, que os “chillers” elétricos apresentam um comportamento dos custos operacionais inversamente proporcionais aos das eficiências energéticas, já que as tarifas de energia não se alteram de acordo com o consumo dos mesmos. Como consequência disto, de acordo com a Tabela 4.4, os “chillers” elétricos alternativos de 100TR são os que apresentam custos operacionais mais altos, inclusive sendo maiores que aqueles apresentados pelos “chillers” movidos diretamente a gás natural. A Tabela 4.4 também mostra que, dentro da conjuntura tarifária vigente para o estado da Bahia, os “chillers” por absorção são perfeitamente viáveis do ponto de vista dos custos operacionais, pois seus correspondentes valores são, em média, 22,5% menores dos que os custos operacionais de seus equivalentes elétricos.

Vale a pena ressaltar que os valores da Tabela 4.4 são referentes apenas aos estudos baseados nos custos operacionais, portanto estes não proverão viabilidade econômica aos equipamentos. Por outro lado, como os

“chillers” movidos a gás natural apresentam custos de aquisição sempre maiores que os equivalentes acionados por energia elétrica, os valores fornecidos pela Tabela 4.4 são de importante valia para o estudo de viabilidade econômica, pois estes representarão a inclinação da reta dos gráficos de custos totais, e possuir custos operacionais menores significa uma reta com inclinação menor que a dos similares elétricos no tocante ao comportamento dos custos totais, provendo um tempo de retorno existente para todas as faixas de aplicação.

Uma análise mais detalhada dos valores da Tabela 4.4 confirmam os estudos feitos por Modenes et al. (2012), que, fundamentados nos custos operacionais, encontraram viabilidade econômica para todas as faixas de aplicação. Por outro lado, naquele estudo foram encontradas diferenças maiores que 30% em prol dos chillers acionados a gás natural, pois estes utilizaram as tarifas vigentes à época no estado de São Paulo, que, para o segmento em questão, apresentavam-se sempre inferiores a 0,90R\$/m³ para todas as faixas de consumo.

4.3.2 Comparações e estudos de viabilidade econômica

Concluídas todas as simulações e comparações econômicas com base nos custos operacionais, pode ser dado prosseguimento aos estudos de viabilidade econômica fundamentados na análise do tempo de retorno ou “payback”. Para realizar as simulações decorrentes desta análise de retorno, além das Equações (3.7) a (3.10), foram também utilizadas planilhas eletrônicas onde além dos custos operacionais previamente obtidos, foram introduzidas informações pertinentes aos custos de aquisição dos equipamentos ($\$_{t=0}$) por tonelada de refrigeração (R\$/T.R.).

Realizando as simulações referentes à faixa de estabelecimentos comerciais cuja demanda de climatização está situada na faixa de 50TR (pequeno porte), coletaram-se os valores dos custos iniciais para cada “chiller”, que constam na Tabela 4.5, junto aos respectivos custos operacionais obtidos anteriormente. Para este caso, serão simulados os comportamentos dos custos para três “chillers”, o elétrico que funciona utilizando compressor “scroll” e tem capacidade nominal de 50TR, um “chiller” movido a gás natural de capacidade

nominal 50TR e que opera conforme ciclo de absorção de simples efeito, bem como outro “chiller”, também movido a gás natural, porém de capacidade 100TR que opera conforme ciclo de absorção com duplo efeito sob condições parciais de carga (IPLV).

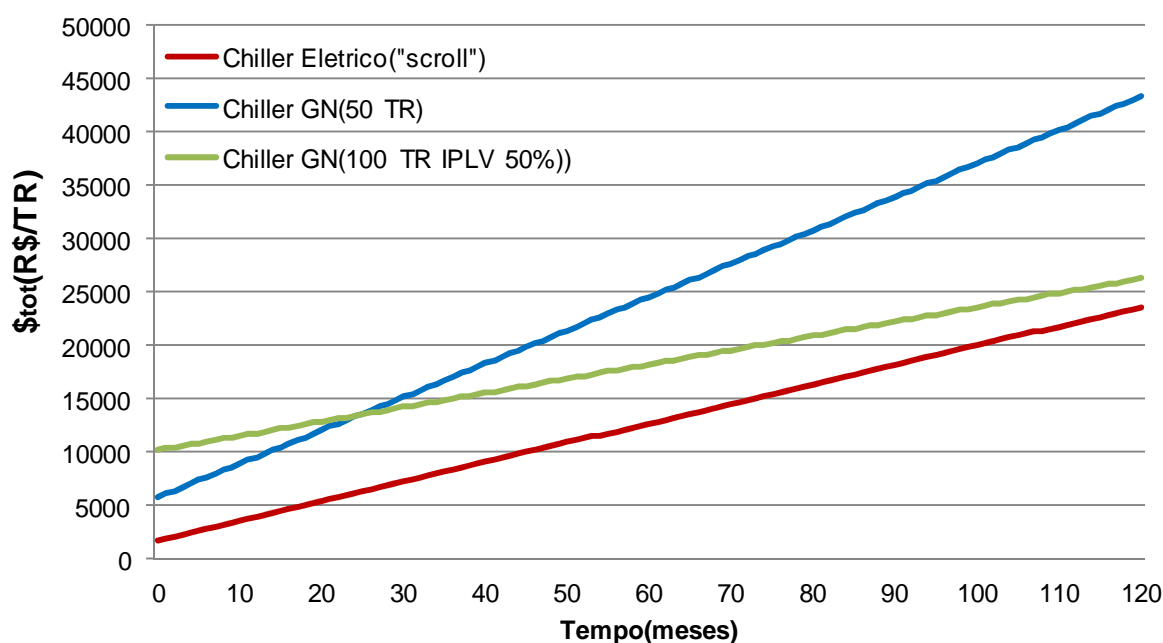
Tabela 4.5 - Custos relacionados aos equipamentos de 50TR

“CHILLERS” de 50TR	Custos de aquisição ($\$_{t=0}$)	Custos operacionais ($\$_{op}$)
Elétrico (“scroll”)	1846,6 R\$/TR	181,6 R\$/(mês*TR)
Absorção de 50T.R. (Simples efeito)	5839,7 R\$/TR	312,4 R\$/(mês*TR.)
Absorção de 100T.R.- IPLV 50%(Duplo efeito)	10236,1 R\$/TR	133,7 R\$/(mês*TR)

Fonte: Elaboração própria (2013).

Com as informações contidas na Tabela 4.5, e utilizando-se a Equação (3.7), obteve-se o Gráfico 4.4, onde pode-se verificar o comportamento dos custos totais ($\$_{tot}$) para cada um dos equipamentos avaliados para a faixa de 50TR.

Gráfico 4.4 – Custos totais para os “chillers” de 50TR



Fonte: Elaboração própria (2013).

As informações do Gráfico 4.4 permitem afirmar que, assim como foi encontrado durante as análises técnicas, o “chiller” a gás natural que opera conforme ciclo de absorção de simples efeito e cuja capacidade é de 50TR não apresenta nenhuma viabilidade também do ponto de vista econômico. O comportamento completamente divergente dos seus custos totais, em relação ao equipamento elétrico faz com que este seja completamente inviável. Em comparação com o “chiller”, também movido a gás natural, de 100TR que opera conforme ciclo de absorção de duplo efeito e aproximadamente 50% de capacidade (IPLV), o equipamento de 50TR também apresenta inferioridade do ponto de vista financeiro, pois mesmo com os custos iniciais 58% maiores devido ao fato de estar se adquirindo um equipamento de 100TR para operar na faixa de 50TR, aquele apresenta um retorno financeiro de 25 meses em comparação com o “chiller” de 50TR. O baixíssimo coeficiente de performance deste último, explicitado durante as comparações energéticas, é um fator preponderante para a determinação de sua inviabilidade econômica.

Observando-se ainda o Gráfico 4.4 verifica-se que mesmo o equipamento acionado a gás natural de 100TR operando em cerca de 50% da capacidade total ainda não consegue atingir o retorno financeiro dentro do prazo limite de 120 meses. Isto se dá pelo fato de que, como pode-se ver na Tabela 4.5, a despeito do fato deste apresentar custos operacionais 35% menores, os custos de aquisição deste ainda são cerca de 450% maiores que seu equivalente elétrico, fazendo com que o tempo de retorno estimado para esta aplicação seja de 175 meses, não provendo a viabilidade econômica requerida. Conseqüentemente, tem-se que realizar uma simulação adicional, de forma a obter a tarifa máxima do gás natural que proporcione o retorno financeiro, ou a igualdade nos custos totais dos “chillers” de 100TR operando a 50% de capacidade e o seu equivalente elétrico, dentro do prazo de 120 meses. Igualando-se, por meio da equação (3.8), os custos totais dos dois equipamentos selecionados, e com base nos custos operacionais obtidos para o “chiller” a gás natural, determinando o valor da tarifa correspondente, por meio da Equação (3.10), obtém-se o valor tarifário máximo do gás natural para este segmento de forma a garantir a viabilidade. Este valor, assim como as demais grandezas utilizadas para obtê-lo constam na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores financeiros ideais para viabilizar o “chiller” de gás natural com 50TR

“CHILLER”	Consumo de GN (m ³ /mês)	Consumo de GN (m ³ /semana)	Custo operacional máximo (\$ _{op}), em R\$/((mês*TR)	Tarifa máxima (R\$/m ³)
Absorção de 100TR(IPLV)	5652	1319	111,738	1,04

Fonte: Elaboração própria (2013).

Para os estabelecimentos cuja demanda correspondente está situada na faixa de 100TR (médio porte), as simulações realizadas forneceram os valores de custos iniciais e operacionais constantes da Tabela 4.7. Neste caso, a comparação é realizada entre dois “chillers”, sendo que o elétrico funciona através de compressor alternativo e tem capacidade nominal de 100TR, e o equivalente acionado a gás natural é um “chiller” de absorção com duplo efeito de 100TR, operando a 100% de sua carga nominal.

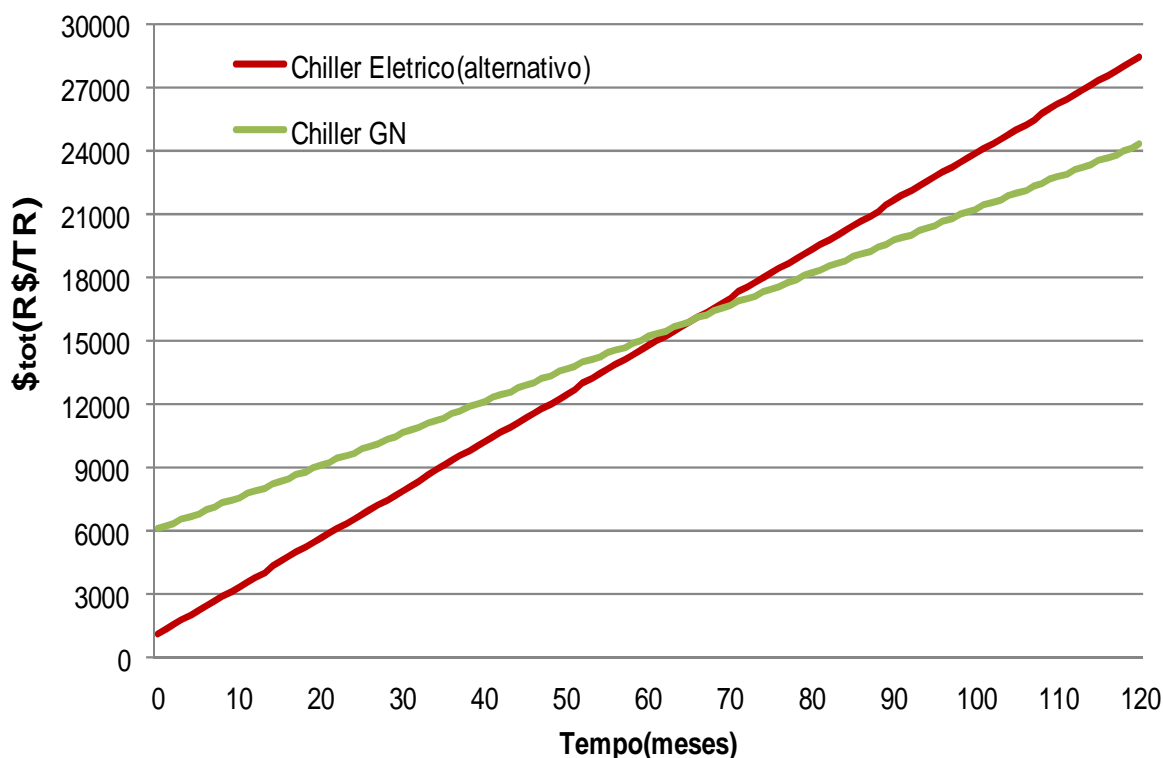
Tabela 4.7 - Custos relacionados aos equipamentos de 100TR

“CHILLERS” de 100TR.	Custos de aquisição(\$ _{t=0})	Custos operacionais(\$ _{op})
Elétrico(alternativo)	1138,8 R\$/TR	228,0 R\$/((mês*TR)
Absorção (Duplo efeito)	6114,09,9 R\$/TR	151,8 R\$/((mês*TR)

Fonte: Elaboração própria (2013).

Por meio dos dados contidos na Tabela 4.7, e aplicando os mesmos na Equação (3.7), foi confeccionado o Gráfico 4.5, onde pode-se comparar diretamente os custos totais para os dois “chillers” de 100TR selecionados neste trabalho.

Gráfico 4.5 – Custos totais para os “chillers” de 100TR



Fonte: Elaboração própria (2013).

Com base nas informações do Gráfico 4.5, pode-se ver que as linhas de custos totais são convergentes, levando conseqüentemente a um tempo de retorno para esta faixa de estabelecimentos, principalmente devido à grande vantagem relativa ao coeficiente de performance apresentada na Tabela 4.1 que se mostra também em prol dos custos operacionais para os “chillers” movidos a gás natural, conforme a Tabela 4.4. Empregando a Equação (3.9), verifica-se que esta convergência produz um tempo de retorno estimado em 65 meses, ou cinco anos e meio, fazendo com que o uso de “chillers” por absorção acionados por meio de gás natural seja viável para os estabelecimentos de médio porte.

Uma análise das tarifas que provêm viabilidade econômica para os equipamentos de 50TR e 100TR podem conduzir a um paradoxo em relação à estrutura tarifária vigente para o gás natural, pois enquanto os equipamentos de 50TR, que consomem menos gás, requerem uma tarifa de 1,04R\$/m³, os “chillers” de 100TR e que apresentam um consumo maior, apresentam-se viáveis dentro da tarifa de 1,31R\$/m³ atualmente em vigor. As tarifas de gás natural em todo o Brasil são feitas em “cascata”, partindo de um pressuposto

que, quanto maior o consumo, menor o valor da tarifa do gás natural a ser aplicada. Isto é o contrário do que foi visto como tarifa que viabilize os empreendimentos de 50TR e 100TR, pois entre estas faixas o consumo de gás aumenta, porém a tarifa que provê viabilidade econômica também sofre um acréscimo. Entretanto, antes de realizar qualquer tipo de conclusão a este respeito, convém proceder ao estudo para as demais faixas estipuladas, de forma a detectar possíveis não linearidades no processo como um todo.

Continuando as simulações realizadas, para a faixa de estabelecimentos cuja demanda de climatização aproximada é de 250TR (grande porte), foram obtidos os valores de custos iniciais e operacionais situados na Tabela 4.8. Para esta faixa, selecionaram-se dois “chillers” sendo que um destes é um equipamento a gás natural operando conforme ciclo de absorção de duplo efeito e 250TR de capacidade nominal e o “chiller” utilizado como referência é um elétrico que utiliza compressor tipo parafuso, de alta eficiência, e cuja capacidade nominal também é cerca de 250TR.

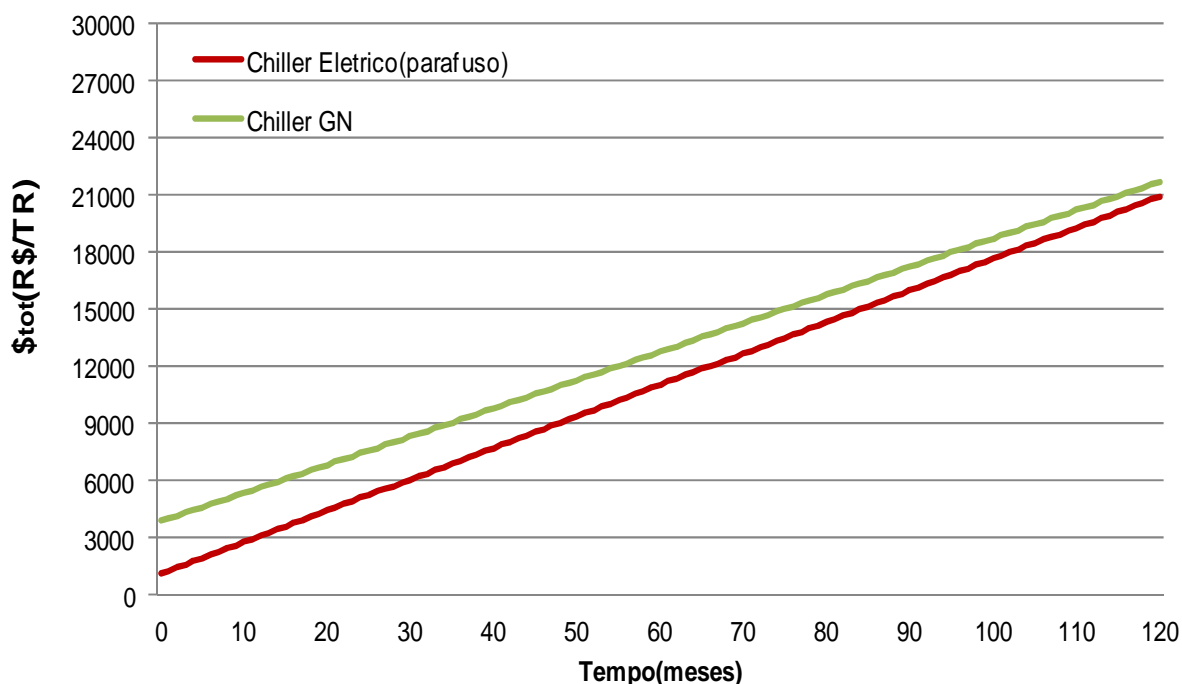
Tabela 4.8 - Custos relacionados aos equipamentos de 250TR

“CHILLERS” de 250TR.	Custos de aquisição ($\\$_{t=0}$)	Custos operacionais ($\\$_{op}$)
Elétrico(parafuso)	1145,9 R\$/TR	165,2 R\$/(mês*TR)
Absorção (Duplo efeito)	3886,9 R\$/TR	148,6 R\$/(mês*TR)

Fonte: Elaboração própria (2013).

De forma a prover uma melhor visualização do comportamento relativo aos custos totais ao longo do tempo, as informações contidas na Tabela 4.8 foram empregadas na Equação (3.7) e posteriormente plotadas no Gráfico 4.6, de forma a prover uma melhor análise.

Gráfico 4.6 – Custos totais para os “chillers” de 250TR



Fonte: Elaboração própria (2013).

Observando detalhadamente o Gráfico 4.6, pode-se concluir que as elevadas eficiências técnicas dos “chillers” elétricos equipados com compressores parafuso produzem uma redução drástica na diferença com relação aos custos operacionais, observada na Tabela 4.4, o que ocasiona pequena divergência no gráfico dos custos totais, extremamente favorável aos equipamentos elétricos. Com isso, apesar da pequena diferença de custos iniciais, o tempo de retorno calculado é de 165 meses, fazendo com que o uso de “chillers” por absorção para os estabelecimentos de grande porte, dentro das condições tarifárias atuais, seja inviável. Portanto, assim como realizado para a faixa de climatização referente à 50TR, de forma a tornar viável o uso dos equipamentos acionados a gás natural para a faixa de 250TR, um valor tarifário limite deve ser calculado. Seguindo o mesmo procedimento adotado na Tabela 4.6, a Tabela 4.9 apresenta os valores máximos para os custos operacionais e tarifa máxima do gás natural para viabilizar a respectiva faixa de consumo.

Tabela 4.9 - Valores financeiros ideais para viabilizar o “chiller” de gás natural com 250TR

“CHILLER”	Consumo de GN (m ³ /mês)	Consumo de GN (m ³ /semana)	Custo operacional máximo (\$ _{op}), em R\$/(mês*TR)	Tarifa máxima (R\$/m ³)
Absorção de 250TR.	22932	5351	142,3	1,13

Fonte: Elaboração própria (2013).

Finalizando o estudo de viabilidade econômica, procederam-se as simulações referentes à faixa de estabelecimentos na qual a demanda de climatização está situada em 500TR. Para estes estabelecimentos, foram selecionados também dois “chillers”, sendo um destes a gás natural que opera conforme ciclo de absorção de queima direta e duplo efeito com capacidade nominal de 500TR, e o equipamento elétrico de “referência”, que é um “chiller” de compressor centrífugo e capacidade nominal idêntica. Os resultados, relativos aos custos envolvidos para os equipamentos selecionados na faixa de 500TR estão apresentados na Tabela 4.10.

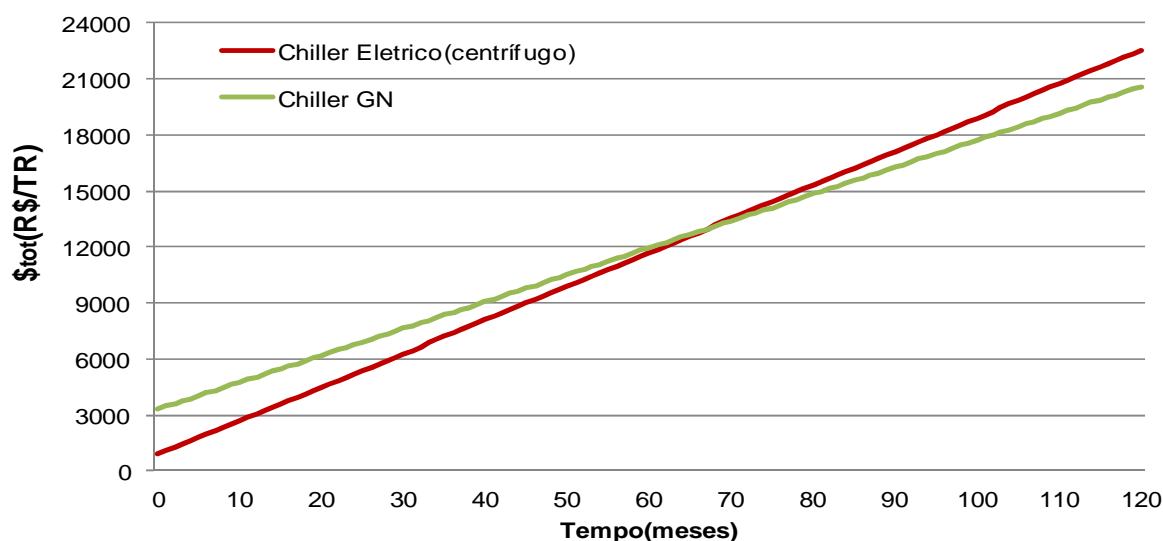
Tabela 4.10 - Custos relacionados aos equipamentos de 500TR

“CHILLERS” de 500TR	Custos de aquisição (\$ _{t=0})	Custos operacionais (\$ _{op})
Elétrico(centrífugo)	893,9 R\$/TR	180,2 R\$/(mês*TR)
Absorção (Duplo efeito)	3325,9 R\$/TR	143,9 R\$/(mês*TR)

Fonte: Elaboração própria (2013).

Almejando verificar o comportamento dos custos totais, empregaram-se os valores da Tabela 4.10 na Equação (3.7), e os dados referentes aos custos totais dos equipamentos em questão foram lançados no Gráfico 4.7.

Gráfico 4.7 – Custos totais para os “chillers” de 500TR



Fonte: Elaboração própria (2013).

Com base no que pode ser observado através do Gráfico 4.7, verifica-se que, para esta faixa, apesar dos baixos custos iniciais dos equipamentos elétricos mostrados na Tabela 4.10, a grande diferença nos custos operacionais mostrada na Tabela 4.4 leva a um comportamento convergente nos custos totais, produzindo um tempo de retorno calculado da ordem de 66 meses, ou cinco anos e meio. Isto faz com que o uso direto de gás natural para climatização também seja economicamente viável para os estabelecimentos de porte especial, cuja demanda de climatização seja superior a 500TR.

Sumarizando os dados coletados durante as simulações, a Tabela 4.11 compara o tempo de retorno calculado para cada faixa de estabelecimentos com o tempo máximo estabelecido pela SRF (1998), permitindo também entre faixas distintas de aplicação mencionadas neste trabalho.

Tabela 4.11 - Comparação entre os tempos de retorno obtidos com o valor máximo de 120 meses

“CHILLER”	Tempo de Retorno (meses)	Tempo Máximo de Retorno (meses)	Redução (%)
50 TR	175	120	45,8
100 TR	65	120	-45,8
250 TR	165	120	37,5
500 TR	66	120	-45

Fonte: Elaboração própria (2013).

Com base nas informações providas pela Tabela 4.11, verificam-se grandes oscilações no tempo de retorno, que são devidas aos fatores envolvidos no cálculo dos custos totais. Entre as faixas de 50TR e 100TR, a variação positiva em prol do gás natural como insumo acontece em virtude da diluição dos custos iniciais do “chiller” de 100TR que foi utilizado para ambas as situações. Para a faixa de aplicação referente a 100TR, este é utilizado em 100% da capacidade, isto faz com que seus custos iniciais sejam reduzidos pela metade, favorecendo o uso deste equipamento. Outro aspecto que contribuiu bastante para esta mudança no tocante a viabilidade dos “chillers” a gás natural em aplicações de 100TR é a redução nas eficiências dos equipamentos elétricos entre 50TR e 100TR visualizada nas Tabelas 4.1 e 4.3, que produziram custos operacionais maiores para os equipamentos de 100TR, se comparados com os de 50TR. Por outro lado, entre as faixas de 100TR e 250TR, foi observada uma variação desfavorável ao uso de gás natural, proporcionada pelas altas eficiências dos “chillers” elétricos que utilizam compressores parafuso, que se refletiram na redução de diferença dos custos operacionais mostrada na Tabela 4.4. Estas altas eficiências mostradas pelos compressores parafuso não são apresentadas também pelos compressores centrífugos utilizados pelos equipamentos elétricos, o que faz com que a faixa de 500TR apresente um quadro novamente favorável ao uso direto do gás natural para estes estabelecimentos. Vale a pena ressaltar que entre 100TR e 500TR as variações de viabilidade são em sua grande parte constituídas pelas variações nas eficiências dos equipamentos elétricos, pois os “chillers” movidos a gás natural destas faixas são todos de duplo efeito, produzindo assim pequenas variações de eficiências entre eles.

Comparando os valores máximos das tarifas de gás que viabilizem os “chillers” movidos por meio deste insumo energético com os valores tarifários atuais aplicados ao setor comercial e que constam da Tabela 3.4, tem-se, em termos percentuais, as reduções propostas na Tabela 4.12, para que o gás natural seja viável em todas as faixas de consumo. Ainda vale a pena ressaltar que as tarifas de gás natural são estratificadas em função das faixas de consumo, neste caso mensuradas em m³/mês.

Tabela 4.12 - Comparação das tarifas para o segmento COMERCIAL com as tarifas máximas

“CHILLER” movido a GN	Consumo de GN (m³/mês)	Faixa de Consumo (m³/mês)	Tarifa (R\$/m³)	Tarifa máxima (R\$/m³)	Redução (%)
50 TR	5626	4501 a 15000	1,3060	1,0414	25,5
100 TR	9144	4501 a 15000	1,3060	viável	0
250 TR	22932	15001 a 30000	1,3040	1,1324	13,2
500 TR	46080	30001 a 180000	1,2674	viável	0

Fonte: Elaboração própria (2013).

Os valores da Tabela 4.12 podem fornecer algumas conclusões. A primeira é que há dois equipamentos cujo consumo de gás natural se situa na mesma faixa (50TR e 100TR), e dentre estes, o “chiller” de 50TR apresenta um valor tarifário máximo para garantir sua viabilidade menor até do que o equipamento correspondente à faixa de consumo superior (250TR), violando a estrutura em “cascata” utilizada para as tarifas de gás natural. Isto significa que, mesmo procedendo com as alterações propostas nas comparações energéticas para esta faixa, que é o uso de “chillers” de 100TR operando em carga parcial (IPLV), não se conseguirá a viabilidade econômica para uso desses equipamentos. Um aspecto técnico que corrobora esta conclusão é o fato de que, na faixa de 50TR os “chillers” concorrem também com outros equipamentos elétricos de expansão direta como “self-contained” e “split-system”, mostrados na Figura 2.5, cujos custos iniciais são, no mínimo, 30% mais baixos do que os dos “chillers” elétricos. Consequentemente, o uso de “chillers” acionados a gás natural para estabelecimentos de pequeno porte, cuja demanda é igual ou inferior a 50TR, é inviável nas condições técnicas e econômicas atuais.

Para o equipamento de 250TR e sua respectiva faixa de consumo, verifica-se que este apresenta tarifa máxima de viabilidade do gás natural inferior às tarifas atuais em mais de 10%. Conforme estabelecido na

metodologia deste trabalho, serão verificados, na tabela de preços da Bahiagás (2013), os valores referentes à categoria tarifária para usos em cogeração, que constam da Tabela 4.13, onde estão relacionados apenas os valores tarifários correspondentes às faixas de consumo utilizadas neste estudo. Os demais valores para esta categoria tarifária estão listados no ANEXO B.

Tabela 4.13 - Tarifas de gás natural para o setor de cogeração

Classe 4 – COGERAÇÃO	Tarifa (R\$/m³)
Consumo de 1 a 450 m ³ /semana	1,9304
Consumo de 451 a 1500 m ³ /semana	1,2555
Consumo de 1501 a 4500 m ³ /semana	1,1983
Consumo de 4501 a 15000 m ³ /semana	1,1516

Fonte: Bahiagás (2013).

Com os valores da Tabela 4.13, pode ser efetuada uma comparação similar àquela feita na Tabela 4.12, porém agora em relação aos valores das tarifas referentes ao segmento de cogeração, e também excluindo os equipamentos de 50TR, que foram considerados inviáveis. Para esta nova configuração, a Tabela 4.14 fornece as diferenças percentuais entre as tarifas vigentes para esta categoria e o valor máximo possível para viabilizar o uso de “chillers” movidos a gás natural em estabelecimentos cuja demanda seja igual a 250TR. Vale a pena ressaltar que, diferentemente da classe comercial, as tarifas para cogeração se baseiam nos consumos medidos em m³/semana.

Tabela 4.14 - Comparação das tarifas para o segmento de COGERAÇÃO com as tarifas máximas

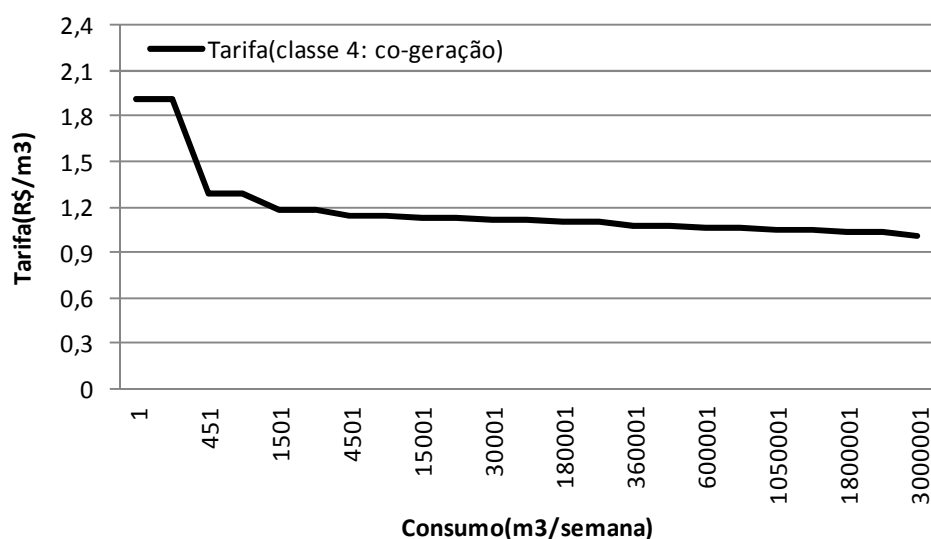
“CHILLER” movido a GN	Consumo de GN (m³/semana)	Faixa de Consumo (m³/semana)	Tarifa (R\$/m³)	Tarifa máxima (R\$/m³)	Redução (%)
100TR	1319	1501 a 4500	1,1983	viável	0
250TR	5351	4501 a 15000	1,1516	1,1324	2,1
500TR	10752	4501 a 15000	1,1516	viável	0

Fonte: Elaboração própria (2013).

Com base nos valores da Tabela 4.14, assim como preconizado na metodologia deste trabalho, pode-se concluir que, como os valores máximos para viabilizar o uso de “chillers” a gás natural de 250TR não constam em nenhuma das categorias tarifárias da Bahiagás (2013), deve-se proceder a uma revisão das tarifas, propondo alternativas. Outro aspecto importante de ser ressaltado é que, assim como foi verificado na Tabela 4.12 para os “chillers” de 50TR e 100TR, a Tabela 4.14 possui dois equipamentos na mesma faixa de consumo semanal de gás natural, que são os “chillers” de 250TR e 500TR. Porém, ao contrário do que foi realizado na comparação anterior, que consistiu em inviabilizar os equipamentos de 50TR, convém manter os dois equipamentos neste estudo. Esta manutenção se dá, pelo ponto de vista técnico, pois Spauschus (1987), e mais recentemente Yu et al. (2013), previram que, para os “chillers” elétricos utilizados no mercado comercial, desenvolvimentos vindouros do compressor parafuso irão permitir seu uso não apenas para a faixa de 250TR, mas em todas as faixas de capacidade citadas neste trabalho. Consequentemente, deve-se não só manter os “chillers” de 250TR neste estudo, como também utilizar seus valores de consumo de gás natural ($5351\text{m}^3/\text{semana}$) e correspondente tarifa máxima associada ($1,1324\text{R}\$/\text{m}^3$) como referencial na determinação da estrutura tarifária ideal do gás natural de forma a viabilizar os “chillers” por absorção.

Definidos os valores a serem utilizados como referência, resta obter o modelo em “cascata” correspondente de forma a respeitar a estrutura tarifária atual, na qual o valor da tarifa é reduzido progressivamente com o aumento do consumo. O Gráfico 4.8 reproduz todas as tarifas referentes à classe de cogeração listadas no ANEXO B, mostrando o comportamento da redução progressiva aplicada a este modelo.

Gráfico 4.8 – Tarifas de gás natural para o setor de cogeração



Fonte: Bahiagás (2013).

Analisando o comportamento do Gráfico 4.8, bem como os dados utilizados para sua confecção, e aplicando os modelos estatísticos de regressão de forma a obter a equação que melhor represente o modelo em “cascata” expresso no Gráfico 4.8, verificou-se que o modelo matemático que melhor se conforma com estes dados é o modelo de função potência, expresso por meio da Equação (4.1), para o qual foi obtido um coeficiente de correlação $R^2=0,91$, significando que esta equação reproduz com fidelidade razoável o modelo vigente para a estrutura tarifária atual.

$$(R\$/m^3) = 1,6284 * (m^3/semana)^{-0,2}$$

(4.1)

Dando seguimento ao raciocínio, o próximo passo é determinar uma equação que respeite o modelo matemático de função potência explicitado na Equação (4.1) e que contemple a tarifa previamente estabelecida como referência, $1,1324R\$/m^3$, para a faixa de consumo correspondente de $4501 m^3/semana$ a $15000m^3/semana$. Mantendo-se a redução progressiva nas tarifas com o aumento do consumo, ou seja, o expoente do fator relativo ao consumo da Equação (4.1), e deslocando a curva do Gráfico 4.8 levemente para baixo, foi determinada a Equação (4.2), que representa o modelo matemático da estrutura tarifária proposta.

$$(R\$/m^3) = 1,6 * (m^3/semana)^{-0,2}$$

(4.2)

A Equação (4.2) possui o mesmo coeficiente de correlação da Equação (4.1), e conseqüentemente a mesma confiabilidade. Aplicando os valores de consumo utilizados pela Bahiagás (2013), obtém-se a Tabela 4.15, contendo a proposta tarifária para viabilizar o uso do gás natural para aplicações de climatização comerciais, na faixa entre 100TR e 500TR. Os valores tarifários obtidos para as demais faixas de consumo, assim como todas as simulações técnico-econômicas realizadas, estão relacionados no APÊNDICE A.

Tabela 4.15 - Tarifas PROPOSTAS de gás natural para viabilizar aplicações comerciais

Classe 4 – COGERAÇÃO	Tarifa proposta (R\$/m³)	Tarifa atual (R\$/m³)	Redução (%)
Consumo de 1 a 450 m ³ /semana	1,8592	1,9304	3,3
Consumo de 451 a 1500 m ³ /semana	1,2146	1,2555	2,8
Consumo de 1501 a 4500 m ³ /semana	1,1783	1,1983	2,4
Consumo de 4501 a 15000 m ³ /semana	1,1324	1,1516	2,1

Fonte: Elaboração própria (2013).

A estrutura tarifária proposta na Tabela 4.17 representa uma redução média de 2,5% em relação aos valores vigentes para o setor de cogeração explicitados na Tabela 4.15. Esses valores tarifários, que viabilizam o uso do gás natural, permitem refazer as simulações referentes à análise de tempo de retorno, provendo então os valores de tempo de retorno para as faixas de capacidade consideradas “viáveis” por meio da Equação (3.9). Os resultados destas simulações estão apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Tempo de retorno aplicando-se a estrutura tarifária proposta

“CHILLER” movido a GN	Consumo de GN (m³/semana)	Faixa de Consumo (m³/semana)	Tarifa proposta (R\$/m³)	Tempo de retorno (meses)
100 TR	2134	1501 a 4500	1,1783	55
250 TR	5351	4501 a 15000	1,1324	120
500 TR	10572	4501 a 15000	1,1324	47

Fonte: Elaboração própria.

Os obtidos da Tabela 4.16, além de validar a metodologia e as simulações realizadas, provisionam um fomento adicional para aqueles que optarem pelo uso de “chillers” acionados por meio de gás natural para os estabelecimentos da faixa relativa a 100TR e 500TR, pois o tempo de retorno obtido é menor que a metade do tempo de retorno máximo estabelecido pela SRF (1998).

Entretanto, verificações adicionais são necessárias de forma a comprovar a viabilidade da estrutura tarifária proposta. Para isto, é necessário identificar, dentro do mercado nacional, unidades da federação cuja estrutura vigente se enquadre dentro daquela proposta neste trabalho. Tomando-se como referência os valores de consumo para o “chiller” de 250TR, foi confeccionada a Tabela 4.17, na qual constam os valores tarifários para cada estado que consome gás natural para fins comerciais, bem como os valores das tarifas correspondentes para a faixa utilizada como referência. Os valores tarifários dos estados citados foram obtidos por meio das concessionárias CEGás (2013) - Ceará, Potigás (2013) - Rio Grande do Norte, PBgás (2013) - Paraíba, Copergás (2013) - Pernambuco, ALgás (2013) - Alagoas, Sergás (2013) - Sergipe, Bahiagás (2013) - Bahia, Gasmig (2013) - Minas Gerais, BR-ES (2013) - Espírito Santo, CEG (2013) - Rio de Janeiro, Comgás (2013) - São Paulo, MScgás (2013) - Mato Grosso do Sul, Compagás (2013) - Paraná, SCgás (2013) - Santa Catarina e Sulgás (2013) - Rio Grande do Sul. Complementando as informações providas pela Tabela 4.19, os números referentes aos

consumos de cada unidade da federação foram obtidos através do relatório da Abegás (2012),

Tabela 4.17 - Valores tarifários do gás natural para estados e regiões do Brasil

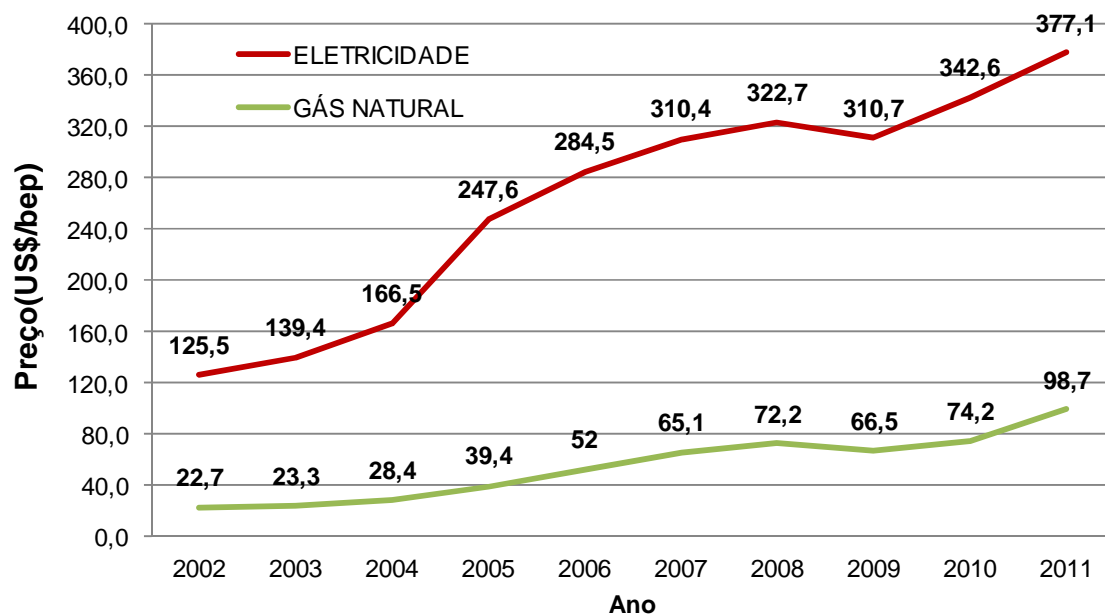
Região	Estado	Consumo (10 ³ m ³ /semana)	Tarifa (R\$/m ³)
NORDESTE		505,4	1,2746(média)
	Ceará	38,7	1,1923
	Rio G. Norte	33,0	2,2194
	Paraíba	13,2	1,3028
	Pernambuco	65,8	1,3558
	Alagoas	53,0	1,4091
	Sergipe	17,1	1,2198
	Bahia	284,6	1,1516
SUDESTE		4660,5	1,2730(média)
	Minas Gerais	142,2	1,1995
	Espírito Santo	39,9	1,0491
	Rio Janeiro	1.958,9	1,6011
	São Paulo	2.519,5	1,0256
SUL		416,6	1,3892(média)
	Paraná	107,1	1,2492
	Santa Catarina	122,2	1,4289
	Rio G. Sul	187,2	1,4434
C. OESTE		3,2	1,6021(média)
	M. G. do Sul	3,2	1,6021
TOTAL		5604,7	1,2831(média)

Fonte: Elaboração própria (2013).

Com base nos valores de cada estado fornecidos pela Tabela 4.17, bem como nas correspondentes médias regionais e nacional, pode-se, em um primeiro momento, verificar que na maioria dos estados, o uso de “chiller” por absorção acionado diretamente por meio de gás natural apresenta-se pouco viável dentro da estrutura tarifária atual vigente não apenas para o estado da Bahia, à exceção dos estados de São Paulo e Espírito Santo, que respondem por 45,7% do gás natural consumido no Brasil e tem valores tarifários compatíveis com os mostrados na Tabela 4.15. Entretanto, estudos feitos por Almeida, Torres e Santos (2003) verificaram que, à época de publicação do trabalho, havia viabilidade financeira para o gás natural em aplicações comerciais valendo-se das tarifas então vigentes, não apenas para o estado da Bahia, mas para todas unidades federativas. Portanto a principal pergunta é: O

que mudou entre 2003 e 2011 de forma a tornar o gás natural pouco viável? A resposta para esta questão pode ser dada por meio do Gráfico 4.9, que está fundamentado nas informações fornecidas pelo BEN2011 (MME, 2012b), que apresenta o comportamento dos custos de gás natural e energia elétrica para os últimos 10 anos, em dólares por barril de petróleo equivalente (US\$/bep).

Gráfico 4.9 – Evolução dos preços de eletricidade e gás natural nos últimos 10 anos

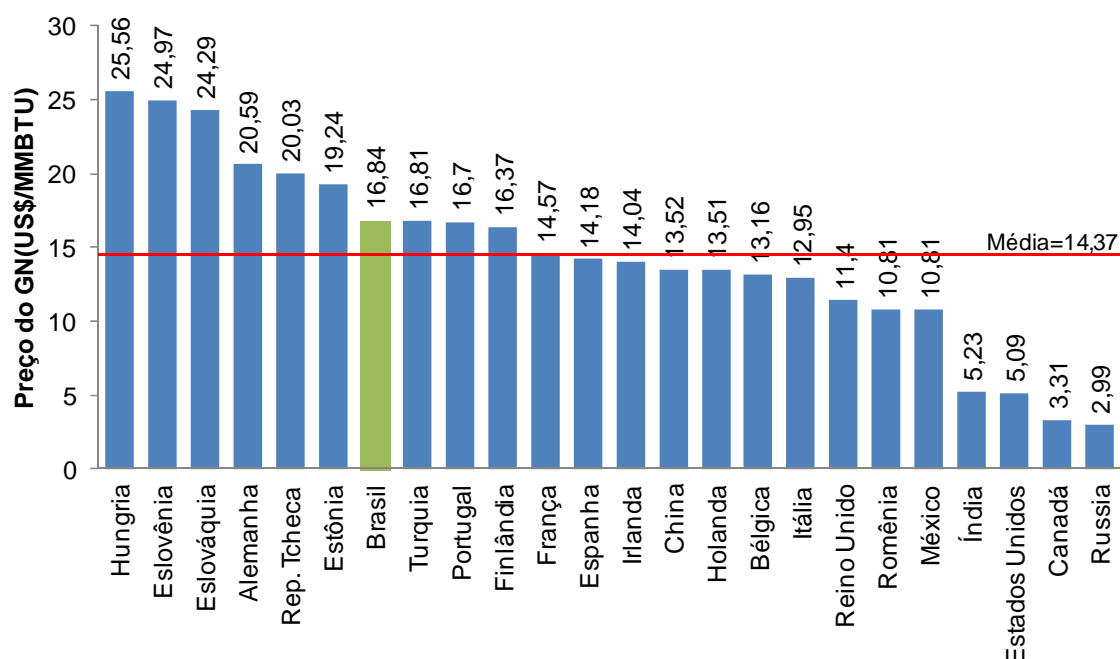


Fonte: MME (2012b).

Analisando as informações fornecidas pelo Gráfico 4.9, verifica-se que o gás natural teve suas tarifas aumentadas em cerca de 335% nos últimos 10 anos, enquanto que a energia elétrica aumentou aproximadamente 201% neste mesmo período. Tomando-se como referência a inflação acumulada dos últimos 10 anos, que de acordo com o IBGE (2013) foi de 76,61% verifica-se que ambos os insumos energéticos sofreram um aumento que pode ser, no mínimo, considerado como abusivo. Retornando ao foco do trabalho, que é a comparação entre os dois insumos energéticos, conclui-se, facilmente, que o gás natural, em função do maior aumento tarifário, sofreu perda de competitividade econômica com relação à energia elétrica, pois teve aumento em suas tarifas 134% maior, ou 1,67 vezes, que a eletricidade neste mesmo intervalo de tempo. Pelo comportamento do Gráfico 4.9, é observa-se que o incremento nas tarifas do gás natural sofre considerável aumento principalmente após o ano de 2004. Como consequência deste aumento de

grandes dimensões nas tarifas, o gás natural comercializado no Brasil é um dos mais caros do mundo, conforme pode ser visto no Gráfico 4.10, do qual constam as tarifas médias de gás natural para alguns países do mundo, em dólares por milhão de BTU métricas (US\$/MMBTU).

Gráfico 4.10 – Tarifas do gás natural para diversos países



Fonte: Firjan (2011).

Por meio dos valores que constam no Gráfico 4.10, tem-se que a tarifa de gás natural média aplicada no Brasil é 17% superior a média dos países citados, e que, tomando-se como base apenas os países referentes ao grupo dos BRICs, esta apresenta-se 133% maior. Conseqüentemente, esforços devem ser empregados no intuito de promover redução tarifária em todo o Brasil, de forma a fomentar a difusão do gás natural como insumo energético para todos os setores, mais especificamente como insumo energético de “chillers” destinados a prover climatização em instalações comerciais. Estes esforços devem envolver, além das empresas responsáveis pela exploração/produção, transporte e distribuição, as agências reguladoras, de forma a prover reduções nos custos da molécula, no transporte e distribuição da mesma, e nos impostos aplicados sobre as tarifas de gás natural.

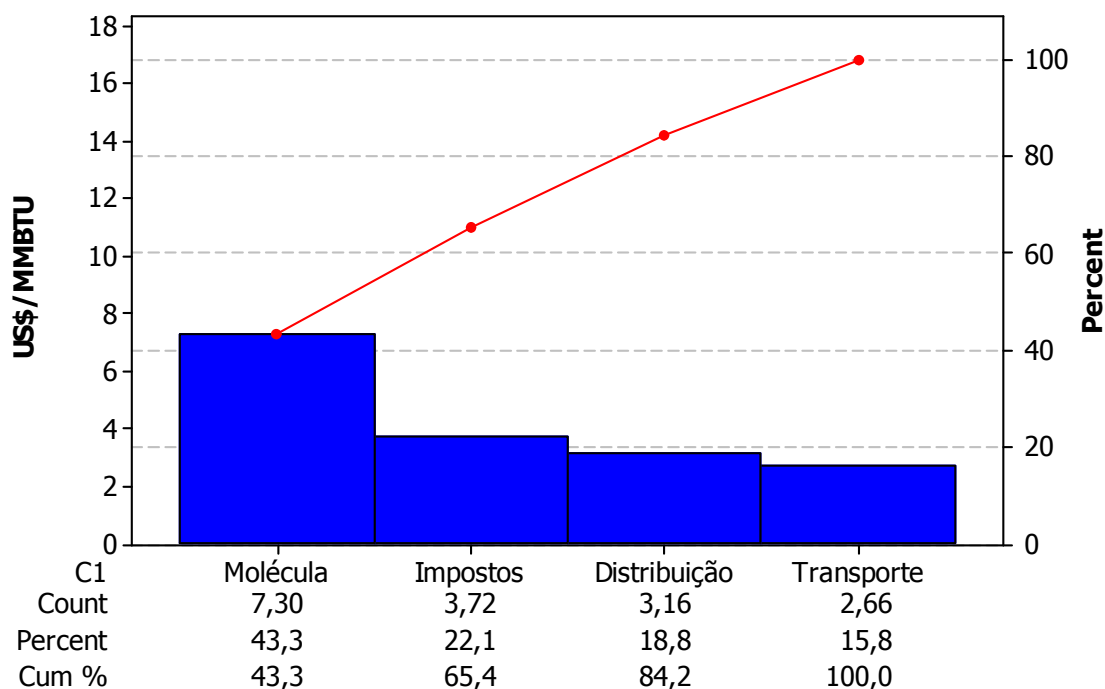
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Findadas todas as simulações técnico-econômicas, pode-se afirmar que a metodologia utilizada correspondeu às expectativas em todos os aspectos analisados. Do ponto de vista técnico, as simulações e comparações propuseram uma alternativa para os “chillers” cuja faixa corresponde a 50TR, produzindo um quadro no qual todos os equipamentos acionados diretamente por meio de gás natural são competitivos mediante os “chillers” elétricos atualmente difundidos no mercado comercial, conforme pode ser visto nas Tabelas 4.1 a 4.3. Porém, durante as simulações e comparações econômicas, foi observada uma inviabilidade financeira para o uso direto de gás natural para climatização de pequenos estabelecimentos comerciais (50TR), pois conforme consta na Tabela 4.12, estes seriam viáveis apenas por meio de uma redução maior que 25% nas tarifas atualmente aplicadas. Para as faixas de aplicação referentes aos estabelecimentos comerciais de porte médio e especial (100TR e 500TR respectivamente), as simulações demonstram que, dentro do contexto tarifário vigente, o uso destes é viável, sem a necessidade de ajustes tarifários. Por outro lado, para os estabelecimentos comerciais de grande porte (250TR), o uso direto de gás natural apresenta-se pouco viável, demandando uma redução de 2,2% nas tarifas atualmente empregadas no estado da Bahia para obter a viabilidade requerida. Também foram observadas tarifas aplicadas em outros estados do Brasil, de forma a identificar por condições tarifárias propícias, por meio da Tabela 4.17, encontrando os estados de São Paulo e Espírito Santo com tarifas compatíveis com a viabilidade econômica para uso de “chillers” com capacidade nominal de 250TR.

Quanto às tarifas atuais que inviabilizam o uso dos equipamentos cuja faixa de aplicação seja igual 250TR, bem como partindo para um âmbito nacional e internacional, este trabalho demonstrou a perda de competitividade do gás natural em relação à energia elétrica no mercado nacional ocorrida nos últimos 10 anos. Outro aspecto ressaltado no Gráfico 4.10 é que, promovendo uma redução de 17% nas tarifas médias de gás natural empregadas no Brasil, de forma a adequar estas às tarifas aplicadas na média de outros países, tornaria o gás natural viável para aplicações de climatização comercial em

estabelecimentos de portes médio grande e especial. Com respeito à tarifa de gás natural aplicada no Brasil, o Gráfico 5.1 mostra os principais fatores que influem na determinação do valor tarifário de 16,84US\$/MMBTU mostrado no Gráfico 4.10.

Gráfico 5.1 – Estratificação das tarifas médias de gás natural empregadas no Brasil



Fonte: Firjan (2011).

A partir das informações do Gráfico 5.1, pode-se verificar que o maior contribuinte para as altas tarifas apresentadas pelo gás natural Brasileiro é a parcela referente à molécula ou “commodity”. Para este fator, de forma a promover reduções nas tarifas de gás natural e assim atender aos anseios propostos neste trabalho, recomenda-se uma reformulação nas políticas de preço do gás natural produzido no Brasil, de forma que as tarifas decorrentes venham a se adequar a uma nova realidade nacional e global, atrelando o preço da molécula ao mercado mundial de gás natural. No tocante aos impostos aplicados, que correspondem ao segundo maior fator determinante das tarifas, segundo Firjan (2011), urge uma reformulação na política tributária do gás natural, através da qual sejam fornecidos incentivos tributários para aplicações de gás natural que desonerem os sistemas de geração e produção de energia elétrica, como o estudo de caso proposto neste trabalho. Quanto à distribuição, que é o terceiro maior contribuinte, convém garantir que as

agências reguladoras estaduais, responsáveis por esta parcela, cumpram seu papel de regulação e divulgação da parcela decorrente, além de promover a inserção da categoria de gás natural para aplicações de climatização e refrigeração nas estruturas tarifárias de todas as unidades federativas, a exemplo da Comgás (2013), Sergás (2013), CEG (2013) e BR-ES (2013). Esta inserção, seja por meio de uma categoria nova restrita para refrigeração e climatização, ou seja conjugando estas aplicações às de cogeração na estrutura tarifária atual, proveria maior transparência em identificar, de forma objetiva, as tarifas a serem de fato utilizadas em aplicações de climatização para fins comerciais. Por fim, quanto à parcela referente ao transporte do gás natural, convém à ANP uma regulação da parcela fixa do transporte, assegurando maior transparência quanto a esses fatores e uma cobrança local dos mesmos. Analisando a cadeia do gás natural como um todo, recomenda-se elaborar de um plano nacional do gás natural, onde a ANP seja fortalecida como órgão regulador do setor e que sejam criadas condições propícias para a entrada de novos “players” em todas as etapas da cadeia, incentivando a competitividade no setor.

Ademais, convém ratificar a eficácia do trabalho em atingir seu objetivo, que é propor como alternativa o uso direto de gás natural em aplicações comerciais de climatização, em vez de energia elétrica, incluindo opções de cunho técnico e econômico objetivando a viabilidade. Esta proposta não visa apenas a diversificação dos insumos energéticos, mas também o uso racional do gás natural, de forma a desonerar a cadeia de energia elétrica existente. Vale a pena ressaltar que a metodologia utilizada contém aspectos abrangentes, podendo ser aplicada em quaisquer comparações envolvendo dois insumos energéticos distintos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho fundamentou-se nos “chillers” atualmente disponíveis no mercado nacional, porém desenvolvimentos futuros que culminarão em novas tecnologias disponíveis no mercado para os próximos três anos estão em curso. Com relação aos “chillers” elétricos, segundo Liu et al. (2012),

desenvolvimentos futuros quanto à usinagem das partes móveis dos compressores parafuso irão promover um aumento da faixa de aplicação dos equipamentos que utilizam tais compressores, para todas as faixas analisadas neste trabalho. Além disso, Lee (2010) prevê para os próximos anos o emprego de inversores de frequência em larga escala para “chillers”, promovendo maior eficiência destes em condições operacionais de carga plena e parcial (IPLV). Do ponto de vista dos equipamentos movidos por meio de gás natural, Kaita (2002) e Gebreslassie, Medrano e Boer (2010) fazem previsão, em um horizonte próximo, para o uso de “chillers” por absorção de triplo efeito, cujo coeficiente de performance supera 1,9, em capacidades superiores a 300TR. Elgendy et al. (2010) aponta para a popularização do uso de “chillers” por compressão e acionado por meio de motores de combustão interna movido a gás natural (GEC), incluindo seu uso em aplicações entre 200TR e 500TR, fazendo estes equipamentos acessíveis ao mercado. Quando da implementação dessas modificações técnicas vindouras, estudos similares incluindo também os custos de manutenção para estas novas configurações são de fundamental relevância para verificação da viabilidade do gás natural como insumo energético em um horizonte próximo.

REFERÊNCIAS

ABREU, P. L.; MARTINEZ, J. A. **Gás natural: o combustível do novo milênio**. 2. ed. Porto Alegre: Plural Comunicação, 2003. 90 p.

ADDY, M. K. Electronic energy saving in refrigeration equipment. **International Journal of Refrigeration**, Warwickshire, UK, v. 10, n. 3, p.175-177, may 1987.

AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE (ARI). **ARI Standard 560**: 2000 standard for absorption water chilling and water heating packages. Arlington, Usa, 2000. 26 p. Disponível em: <http://www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/standards%20pdfs/ANSI%20standards%20pdfs/ANSI%20ARI560-2000.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2013.

AIR-CONDITIONING, HEATING AND REFRIGERATION INSTITUTE (AHRI). **AHRI Standard 550/590 (I-P)**: 2011 Standard for Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle. Arlington, USA, 2011. 74 p. Disponível em: <[http://www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/standards%20pdfs/AHRI%20standards%20pdfs/AHRI%20Standard%20550-590%20\(I-P\)-2011.pdf](http://www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/standards%20pdfs/AHRI%20standards%20pdfs/AHRI%20Standard%20550-590%20(I-P)-2011.pdf)>. Acesso em: 13 jun. 2013.

ALMEIDA, F. S.; TORRES, E. A.; SANTOS, C. A. C. Estudo comparativo energético e exergético entre chiller de absorção e por compressão. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2003, Coimbra, Portugal. **Anais ...** Coimbra: Gráfica de Coimbra, Ltda, 2003. v. 1, p. 265 - 270.

ARAÚJO, J. G. J. P. **Simulação de uma unidade de refrigeração por absorção usando o par água-amônia nos regimes permanente e transiente**. 2010. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

AROUCA, L. B.; ALMEIDA, A. G. S.; TORRES, E. A. Estudo de viabilidade econômica de um sistema de ar-condicionado por absorção em veículos de transporte coletivo. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 7., 2012, Palmas, To. **Anais...** 2012. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/view/4335/2466>>. Acesso em: 11 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO (Abegás). **Relatório ABEGÁS - mercado e distribuição.**: Novembro de 2012. Rio de Janeiro: Gás Brasil Mídia Editorial, 2012. 33 p. (52). Disponível em: <http://www.abegas.org.br/Site/relatorios/2012_Relatorio_Abegas_Out_Nov.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SHOPPING CENTERS (ABRASCE). **Evolução do Setor.** Disponível em: <<http://www.portaldoshopping.com.br/sobreosetor.asp>>. Acesso em: 12 maio 2013.

BROAD. **Broad X non-electric chiller:** model selection & design manual. 2. ed. Changsha, China: [s.n.], 2011. 56 p. Disponível em: <http://www.broadusa.com/index.php/lieterature/doc_download/42-broad-x-non-electric-chiller>. Acesso em: 25 mar. 2013.

CATÃO, Rafael de Castro. A história da dualidade brasileira e a constituição do setor elétrico no país. **Geografia em Atos:** UNESP, Presidente Prudente, v. 3, n. 8, p.30-39, dez. 2008. Semestral. Disponível em: <<http://revista.fct.unesp.br/index.php/geografiaematos/article/view/263/rafaeln8v2>>. Acesso em: 22 jul. 2013.

CECCHINATO, Luca. Part Load efficiency of packaged air-cooled water chillers with inverter-driven scroll compressors. **Energy Conversion and Management**, Padova, Italy, v. 51, n. 7, p.1500-1509, jul. 2010.

COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA (Coelba). **Tarifas de energia elétrica - GRUPO A:** horossazonal - verde A3a (30 a 44 kV).

Disponível em: <http://servicos.coelba.com.br/Media/pdf/HOROSAZONAL_-_VERDE_A3a-30_a_44kV.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA (Bahiagás). **O que é o gás**

natural: composição e propriedades. Disponível em:

<<http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/o-que-e-gas-natural>>. Acesso em: 14 maio 2013.

COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA (Bahiagás). **Tabela tarifária.** Disponível em:

<<http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/tabela-tarifaria>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DE MINAS GERAIS (Gasmig). **Tabelas de**

tarifas: atualizado em 1/8/2013. Disponível em:

<<http://www.gasmig.com.br/Tarifa/Tarifa.aspx>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DE SANTA CATARINA (SCgás). **Tarifa do gás**

natural: segmento comercial. Disponível em: <<http://www.scgas.com.br/site/comercial/info/tarifacomercial>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO (COMGÁS). **Tarifas do gás natural**

canalizado - segmento refrigeração: vigência em 31/05/2013. Disponível em:

<<http://www.comgas.com.br/pt/nossosServicos/Tarifas/Paginas/refrigeracao.aspx>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DO CEARÁ (CEgás). **Tabela de preços:** vigência em

01 de abril de 2012. Disponível em:

<http://www.cegas.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=188&Itemid=163>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

(MSgás). **Tarifa do gás natural comercial.** Disponível em:

<<http://www.msgas.com.br/?conteudo=segmentos&cor=vermelho&id=127&idCanal=116>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

COMPANHIA DE GÁS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (Sulgás). **Tarifa do gás natural comercial**. Disponível em: <http://www.sulgas.rs.gov.br/simulador_comercial.asp>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA PARAIBANA DE GÁS (PBgás). **Tarifas**: vigência a partir de 01 de agosto de 2013. Disponível em: <http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA PARANAENSE DE GÁS (Compagás). **Tabela de preços comercial**: vigência a partir de 01 de abril de 2013. Disponível em: <<http://www.compagas.com.br/agv/index.php?action=uiprecos.index&segmento=2>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE GÁS (Copergás). **Tabela de tarifas**: vigência a partir de 01 de agosto de 2013. Disponível em: <<http://www.copergas.com.br/index.php/atendimento-ao-cliente/tarifas>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

COMPANHIA POTIGUAR DE GÁS (Potigás). **Sistema tarifário da potigás**: vigência a partir de 01 de agosto de 2013. Disponível em: <<http://www.potigas.com.br/sistema-tarifario>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

CORREIA, S. P. S. **Tarifas e a demanda de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 91 p.

CORTEZ, L. A. B. Refrigeração por Absorção com o par água-amônia e seu potencial no caso brasileiro. **Revista Abrava**, São Paulo, n. 17, p.33-38, jul. 1984.

COSTA, E. C. **Física aplicada à construção**: conforto térmico. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 357 p.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 318 p.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Exergy**: energy, environment and sustainable development. 2. ed. Oxford, Uk: Elsevier, 2012. 576 p.

ELGENDY, E. et al. Performance of a gas engine heat pump (gehp) using r410a for heating and cooling applications. **Energy**, Magdeburg, Germany, v. 35, n. 12, p.4941-4948, dec. 2010.

FARSHI, L. G.; MAHMOUDI, S. M. S.; ROSEN, M. A. Exergoeconomic comparison of double effect and combined ejector-double effect absorption refrigeration systems. **Applied Energy**, Tabriz, Iran, v. 103, p.700-711, mar. 2013.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO RIO DE JANEIRO (Firjan). Quanto Custa o Gás Natural para a Indústria no Brasil? **Estudos para o Desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, n. 9, p.3-31, dez. 2011.

Disponível em:

<<http://www.firjan.org.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908CEC34151F4301343733A4D44882>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

GÁS DE ALAGOAS S.A.(ALgás). **Tarifas do setor comercial**: vigência a partir de 01 de agosto de 2013. Disponível em: <<http://www.algas.com.br/tarifas-comercio>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

GÁS NATURAL FENOSA (CEG). **Tarifas de gás natural**: vigentes a partir de 04/03/2013. Disponível em: <http://www.agenersa.rj.gov.br/agenersa_site/index.php?option=com_content&view=article&id=941&Itemid=86>. Acesso em: 05 ago. 2013.

GEBRESLASSIE, B. H.; MEDRANO, M.; BOER, D. Exergy analysis of multi-effect water–libr absorption systems: from half to triple effect. **Renewable Energy**, Tarragona, Spain, v. 35, n. 8, p.1773-1782, aug. 2010.

GOLDEMBERG, J.; PRADO, L. T. S. Reforma e crise no setor elétrico no período FHC. **Tempo Social**: USP, São Paulo, v. 15, n. 2, p.219-235, nov. 2003. Disponível em:

<<http://www.fflch.usp.br/sociologia/temposocial/site/images/stories/edicoes/v152/v15n2a08.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2013.

GREIN, A.; PEHNT, M. Load Management for refrigeration systems: potentials and barriers. **Energy Policy**, Berlin, Germany, v. 39, n. 9, p.5598-5608, sep. 2011.

GRIPPI, S. **O gás natural e a matriz energética nacional**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 116 p.

HEROLD, K.; RADERMACHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption chillers and heat pumps**. Boca Raton, USA: CRC Press, 1996. 330 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Índice nacional de preços ao consumidor amplo**: séries históricas. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Precos_Indices_de_Precos_ao_Consumidor/IPCA/Serie_Historica/ipca_201307SerieHist.zip>. Acesso em: 19 jul. 2013.

INSTITUTO PARA DESENVOLVIMENTO DO VAREJO (IDV). **Varejo em números**: o varejo brasileiro. Disponível em: <<http://www.idv.org.br/varejo-dados-brasil.aspx>>. Acesso em: 11 maio 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Gas medium term market report**: market trend and projections to 2018. Disponível em: <<http://www.iea.org/Textbase/npsum/MTGMR2013SUM.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2013.

KAITA, Y. Simulation results of triple-effect absorption cycles. **International Journal of Refrigeration**, Osaka, Japan, v. 25, n. 7, p.999-1007, nov. 2002.

KARAMANGIL, M. I. et al. A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Bursa, Turkey, v. 14, n. 7, p.1969-1978, sep. 2010.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. Malabar, Florida: Krieger Publishing Corporation, 1995. 328 p.

LEE, C. K. Dynamic performance of ground-source heat pumps fitted with frequency inverters for part-load control. **Applied Energy**, Hong Kong, v. 87, n. 11, p.3507-3513, nov. 2010.

LIU, J. et al. A new model of screw compressor for refrigeration system simulation. **International Journal of Refrigeration**, Yantai, China, v. 35, n. 4, p.861-870, jun. 2012.

LORENTZEN, G. Energy and refrigeration. **International Journal of Refrigeration**, Trondheim, Norway, v. 6, n. 5-6, p.262-273, sep./nov. 1983.

LORENTZEN, G. Heat pumps - where are improvements possible? An exercise in exergy. **International Journal of Refrigeration**, Trondheim, Norway, v. 9, n. 2, p.105-107, mar. 1986.

LORENTZEN, G. Influence of speed on compressor volumetric efficiency. **Refrigeration Engineering**, Trondheim, Norway, v. 60, n. 3, p.272-291, mar. 1952.

LORENTZEN, G. Throttling, the internal haemorrhage of the refrigeration process. In: THE INSTITUTE OF REFRIGERATION, 3., 1984, London, UK. **Proceedings....** Cambridge, UK: International Institute Of Refrigeration, 1984. p. 39 - 47.

MCGRATH, W. L. New refrigeration system reduces electrical demand of air conditioning equipment. **Refrigeration Engineering**, London, UK, v. 65, n. 2, p.52-64, feb. 1957.

MILLER, R.; MILLER, M. **Air conditioning and refrigeration**. 2. ed. New York, Usa: Mcgraw-hill, 2011. 624 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário estatístico de energia elétrica 2011**. Brasília, DF: MME:EPE, 2012a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20120914_1.pdf>. Acesso em: 25 maio 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço energético nacional 2011**: relatório final. Brasília, DF: MME:EPE, 2012b. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 12 abril 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano decenal de expansão de energia 2021**: relatório final. Brasília, DF: MME:EPE, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20130326_1.pdf>. Acesso em: 4 julho 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030**: documento final. Brasília, DF: MME:EPE, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 23 maio 2013.

MÓDENES, A. N. et al. Modelagem e simulação de sistemas de refrigeração por absorção. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p.13-21, abr. 2012.

MONÉ, C. D.; CHAU, D. S.; PHELAN, P. E. Economic feasibility of combined heat and power and absorption refrigeration with commercially available gas turbines. **Energy Conversion And Management**, Tempe, USA, v. 42, n. 13, p.1559-1573, sep. 2001.

MONTEIRO, J. V. F.; SILVA, J. R. N. M. **Gás natural aplicado à indústria e ao grande comércio**. São Paulo: Blucher, 2010. 182 p.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009. 829 p.

MOROSUK, T.; TSATSARONIS, G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. **Energy**, Szczecin, Poland, v. 33, n. 6, p.890-907, jun. 2008.

NOWOTNY, S. Some considerations concerning the optimum operating conditions of refrigerating machinery, especially those of absorption machines by using the exergy concept. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION, 16., 1983, Paris. **Proceedings...** Cambridge: CRT, 1983. v. 2, p. 10 - 17.

- OLIVEIRA, P. P. **Fundamentos de termodinâmica aplicada: análise energética e exérgica**. Lisboa, Portugal: Lidel, 2012. 471 p.
- PETROBRÁS DISTRIBUIDORA DE GÁS NATURAL DO ESPÍRITO SANTO (BR-ES). **Tarifas vigentes**: a partir de 01/08/2013. Disponível em: <<http://www.aspe.es.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 5 ago. 2013.
- PRATIHAR, A. K.; KAUSHIK, S. C.; AGARWAL, R. S. Performance evaluation of a small capacity compression–absorption refrigeration system. **Applied Thermal Engineering**, New Delhi, India, v. 42, p.41-48, sep. 2012.
- RIENZO, C. R. **Memória da refrigeração e do ar condicionado no brasil**: uma história a ser contada. São Paulo: Sindratar, 2007. 215 p.
- ROBUR. **Integrated heating and cooling solutions with Absorption Heat Pumps powered by natural gas and renewable energies**. Verdellino, Italy, 2013. 52 p. Disponível em: <http://www.robur.com/documenti_prodotto/ROBUR_ABSO_EN_2013_07_c-20130715090956.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2013.
- ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. **Estudos Avançados**: USP, São Paulo, v. 21, n. 59, p.39-58, abr. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100007&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- ROSS, S.; WESTERFIELD, R. **Fundamentos de administração financeira**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 782 p.
- SANTANA, G. C. S. **Análise energética e exérgica em um sistema de cogeração para uma empresa do setor terciário**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2003.
- SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3. ed. Itajubá: Fupai, 2006. 596 p.

SANTOS, C. M. S. **Análise exergoeconômica de uma unidade de cogeração a gás natural com refrigeração por absorção**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

SECRETARIA DA RECEITA FEDERAL (SRF). Instrução Normativa SRF nº 162, de 31 de dezembro de 1998: Fixa prazo de vida útil e taxa de depreciação dos bens que relaciona. **Diário Oficial [da] União**. Brasília, DF, 07 janeiro 1999. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/Legislacao/ins/Ant2001/1998/in16298.htm>>. Acesso em: 26 jul. 2013.

SERGIPE GÁS S.A. (SERGÁS). **Tarifas para cogeração e climatização**: vigência a partir de 01 de abril de 2013. Disponível em: <<http://www.sergipegas.com.br/>>. Acesso em: 5 ago. 2013.

SHAW, D. N. Helical Rotary screw compressor heating/cooling systems. **Ashrae Transactions**, Atlanta, USA, v. 83, n. 1, p.177-184, 1977.

SHEKARCHIAN, M. et al. Energy savings and cost-benefit analysis of using compression and absorption chillers for air conditioners in Iran. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, Malaysia, v. 15, n. 4, p.1950-1960, may 2011.

SILVA, N, F. **Compressores alternativos industriais: teoria e prática**. São Paulo: Interciência, 2009. 420 p.

SILVA, S. C.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. S. Conceitos fundamentais da propriedade termodinâmica exergia e exemplos de aplicação para análise de processos reais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p.2025-2037, jun. 2012.

SOUSA, B. F. C. R. **Modelação de um sistema de refrigeração por absorção**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2011.

- SPAUSCHUS, H. O. Development in refrigeration: technical advances and opportunities for the 1990s. **International Journal of Refrigeration**, Atlanta, USA, v. 10, n. 5, p.263-270, sep. 1987.
- STILLSON, T. Helical rotary screw compressor applications for energy conservation. **Ashrae Transactions**, Atlanta, USA, v. 83, n. 1, p.184-201, 1977.
- STOECKER, W. F. **Industrial refrigeration handbook**. 2. ed. New York: Mcgraw-hill, 2009. 782 p.
- SUN, Z. G. Experimental Investigation of Integrated Refrigeration System (IRS) with Gas Engine, Compression Chiller and Absorption Chiller. **Energy**, Guangzhou, China, v. 33, n. 3, p.431-436, mar. 2008.
- SZARGUT, J. Component efficiencies of a vapour-compression heat pump. **Exergy: an International Journal**, Gliwice, Poland, v. 2, n. 2, p.99-104, jun. 2002.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 332 p.
- TALBI, M. M.; AGNEW, B. Exergy Analysis: an absorption refrigerator using lithium-bromide and water as the working fluids. **Applied Thermal Engineering**, Tripoli, Libya, v. 19, n. 10, p.609-630, may 2000.
- TORELLA, E. et al. On-site real-time evaluation of an air-conditioning direct-fired double-effect absorption chiller. **Applied Energy**, Valencia, Spain, v. 86, n. 6, p.968-975, jun. 2009.
- TRANE. **CenTraVac™ Water-cooled liquid chillers: 120–3950 TONS MODEL CVGF**. 3. ed. Lacroisse, USA, 2013. 92 p. Disponível em: <[http://www.trane.com/webcache/rf/centrifugal%20liquid%20chillers%20\(ctv\)/product/ctv-prc007-en_06272013.pdf](http://www.trane.com/webcache/rf/centrifugal%20liquid%20chillers%20(ctv)/product/ctv-prc007-en_06272013.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2013.
- TRANE. **Resfriadores de LÍQUIDO CGWA/CGOA** : condensação a água, compressores H e SH recíprocos 10TR a 220TR. São Paulo, 1998. 90 p.

TRANE. **Resfriadores de líquido CGWD**: condensação a água, compressor SCROLL, 20TR a 60TR. 2. ed. Araucária, PR, 2004. 24 p. Disponível em: <[http://www.trane.com/webcache/rf/scroll%20and%20reciprocating%20liquid%20chillers%20\(cg\)/product/cg-prc003-pt_03012004.pdf](http://www.trane.com/webcache/rf/scroll%20and%20reciprocating%20liquid%20chillers%20(cg)/product/cg-prc003-pt_03012004.pdf)>. Acesso em: 9 mar. 2013.

TRANE. **Series R™ Helical Rotary Liquid Chillers**: 60-250 Nominal Tons Model RTWD Water-Cooled. 2. ed. Lacroisse, USA, 2012. 56 p. Disponível em: <[http://www.trane.com/webcache/rf/rotary%20liquid%20chillers%20\(rlc\)/product/rlc-prc029-en_10202012.pdf](http://www.trane.com/webcache/rf/rotary%20liquid%20chillers%20(rlc)/product/rlc-prc029-en_10202012.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2013.

TROTT, A. H.; WELSH, G. C. **Refrigeration and air conditioning**. 4. ed. Oxford, UK: Butterworth-heinemann Ltd, 2008. 392 p.

VAKILOROAYA, V.; HA, Q. P.; SAMALI, B. Energy-efficient HVAC systems: simulation–empirical modelling and gradient optimization. **Automation in Construction**, Sydney, Australia, v. 31, p.176-185, may 2013.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001. 590 p.

VILLA, A. A. O.; DUTRA, J. C. C.; GUERRERO, J. R. H. **Introdução a análise de sistemas de refrigeração por absorção**. Recife: Edufpe, 2012. 227 p.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). **Além das grandes hidrelétricas**: políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Brasília, 2012. 44 p. Disponível em: <<http://www.wwf.org.br/informacoes/biblioteca/?32143/Alm-de-grandes-hidreltricas-polticas-para-fontes-renovveis-de-energia-eltrica-no-Brasil>>. Acesso em: 25 jul. 2013.

YAMANE, E.; SAITO, H. **Tecnologia do condicionamento de ar**. São Paulo: Edgard Blucher, 1986. 357 p.

YU, F. W. et al. Energy simulation of sustainable air-cooled chiller system for commercial buildings under climate change. **Energy and Buildings**, Hong Kong, v. 64, p.162-171, sep. 2013.

YUMRUTAS, R.; KUNDUZ, M.; KANOGLU, M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems. **Exergy: an International Journal**, Gaziantep, Turkey, v. 2, n. 4, p.266-272, apr. 2002.

APÊNDICE A – Simulações técnico-econômicas

1 - SIMULAÇÕES PARA CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS

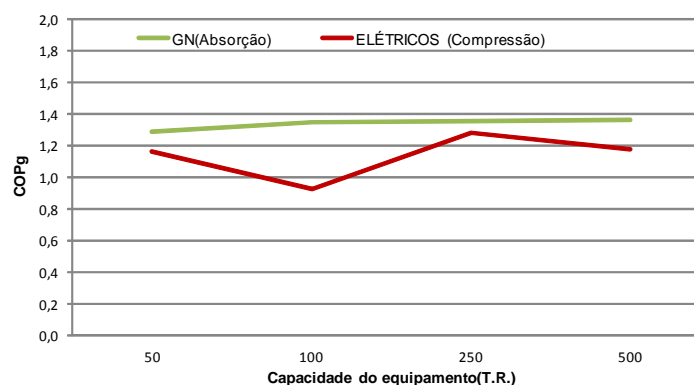
CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

Modelo	VAZÃO(l/s)	Te	Ts	Dh	Ql(kW)	Wc(kW)	COP	COPg	Ql(TR)
CGWD-050 (50TR)	7,40	12,50	7,00	23,02	170,37	43,60	3,908	1,165	48,46
CGOA-100 (100TR)	15,20	12,50	7,00	23,02	349,95	112,40	3,113	0,928	99,53
RTWD-250 (250TR)	34,98	12,50	7,00	23,02	805,34	187,40	4,297	1,282	229,05
CVGF-500 (500TR)	77,50	12,50	7,00	23,02	1784,28	453,00	3,939	1,175	507,48

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	VAZÃO(l/s)	Te	Ts	Dh	Ql(kW)	m(m ³ /h)	COP	COPg	Ql(TR)
ACF60-72HR (50TR)	7,80	12,50	7,00	23,02	179,58	26,50	0,665	0,665	51,07
BZY30 (100TR)	14,90	12,50	7,00	23,02	343,04	25,40	1,345	1,345	97,57
BZY75 (250TR)	37,50	12,50	7,00	23,02	863,36	63,70	1,359	1,359	245,55
BZY150 (500TR)	75,60	12,50	7,00	23,02	1740,54	128,00	1,364	1,364	495,03
BZY30 (100TR 50% IPLV))	8,90	12,50	7,00	23,02	204,90	15,70	1,291	1,291	58,27779

COMPARAÇÃO - EFICIÊNCIA GLOBAL			
CAPACIDADE (TR)	ELÉTRICOS (Compressão)	GN (Absorção)	variação %
50(IPLV)	1,17	1,29	-10,78%
100	0,93	1,35	-44,88%
250	1,28	1,36	-6,07%
500	1,17	1,36	-16,17%



2 - SIMULAÇÕES PARA CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS EXERGÉTICAS

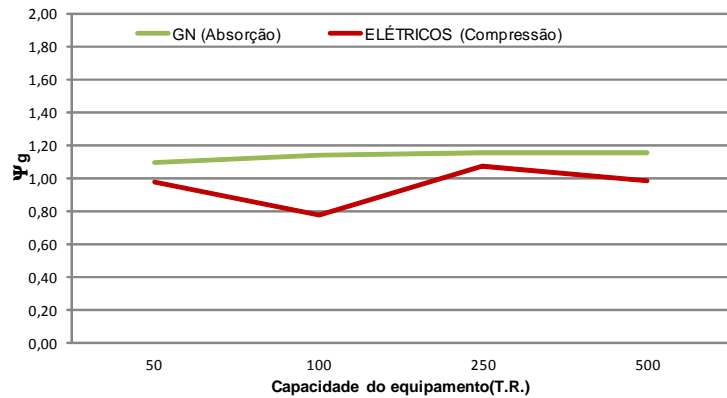
CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

Modelo	VAZÃO(l/s)	Te	Ts	Dh	Ds	DEXI(kW)	Wc(kW)	EF.EX	EF.Ex(gl)
CGWD-050 (50TR)	7,40	12,50	7,00	23,02	3,73	142,80	43,60	3,275	0,977
CGOA-100 (100TR)	15,20	12,50	7,00	23,02	3,73	293,32	112,40	2,610	0,778
RTWD-250 (250TR)	34,98	12,50	7,00	23,02	3,73	675,03	187,40	3,602	1,074
CVGF-500 (500TR)	77,50	12,50	7,00	23,02	3,73	1495,55	453,00	3,301	0,984

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	VAZÃO(l/s)	Te	Ts	Dh	Ds	DEXI(kW)	m(m ³ /h)	EF.EX	EF.Ex(gl)
ACF60-72HR (50TR)	7,80	12,50	7,00	23,02	3,73	150,52	26,50	0,563	0,563
BZY30 (100TR)	14,90	12,50	7,00	23,02	3,73	287,53	25,40	1,139	1,139
BZY75 (250TR)	37,50	12,50	7,00	23,02	3,73	723,66	63,70	1,151	1,151
BZY150 (500TR)	75,60	12,50	7,00	23,02	3,73	1458,89	128,00	1,155	1,155
BZY30 (100TR 50% IPLV)	8,90	12,50	7,00	23,02	3,73	171,75	15,70	1,093	1,093

COMPARAÇÃO - EFICIÊNCIA GLOBAL			
CAPACIDADE (TR)	ELÉTRICOS (Compressão)	GN (Absorção)	variação %
50	0,98	1,09	-11,87%
100	0,78	1,14	-46,32%
250	1,07	1,15	-7,13%
500	0,98	1,16	-17,33%



3 - SIMULAÇÕES PARA CÁLCULO DOS CUSTOS OPERACIONAIS

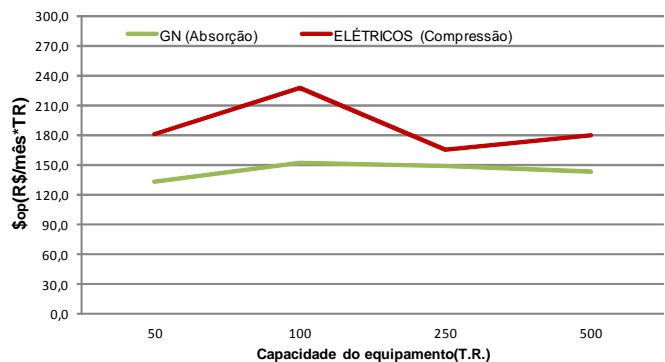
CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

Modelo	Consumo(kW)	Capacidade(TR)	R\$/ (mês*TR)
CGWD-050 (50TR)	43,60	40,61	181,65
CGOA-100 (100TR)	112,40	83,42	227,98
RTWD-250 (250TR)	187,40	191,99	165,17
CVGF-500 (500TR)	453,00	425,36	180,21

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	Consumo(m3/h)	Consumo(kW)	CAPACIDADE (TR)	Consumo(m3/mês)	R\$/ (mês*TR)
ACF60-72HR (50TR)	26,50	8,20	42,81	9540	312,4007119
BZY30 (100TR)	25,40	4,20	81,78	9144	151,7585511
BZY75 (250TR)	63,70	6,10	205,82	22932	148,5962452
BZY150 (500TR)	128,00	11,60	414,93	46080	143,8698164
BZY30 (100TR 50% IPLV)	15,70	3,70	58,28	5652	133,74267

COMPARAÇÃO - CUSTOS OPERACIONAIS, em R\$/ (mês*TR)			
CAPACIDADE (TR)	ELÉTRICOS (Compressão)	GN (Absorção)	variação %
50	181,6	133,7	-26,37%
100	228,0	151,8	-33,43%
250	165,2	148,6	-10,03%
500	180,2	143,9	-20,16%



4 - ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA (50TR)

CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

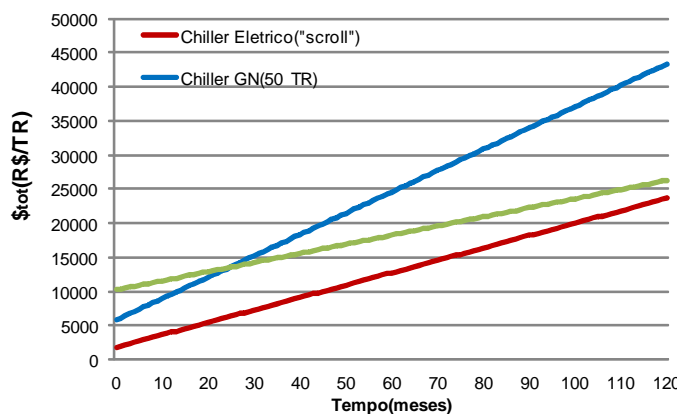
Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
CGWD-050 (50TR)	1846,6	181,6

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
ACF60-72HR (50TR)	5839,7	312,4
BZY30 (100TR 50% IPLV)	10236,0	133,7

tempo de retorno(meses)
175,1

Custo operacional ideal do GN	111,74 R\$/mês*TR
Tarifa ideal do GN	1,04 R\$/m3



5 - ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA (100TR)

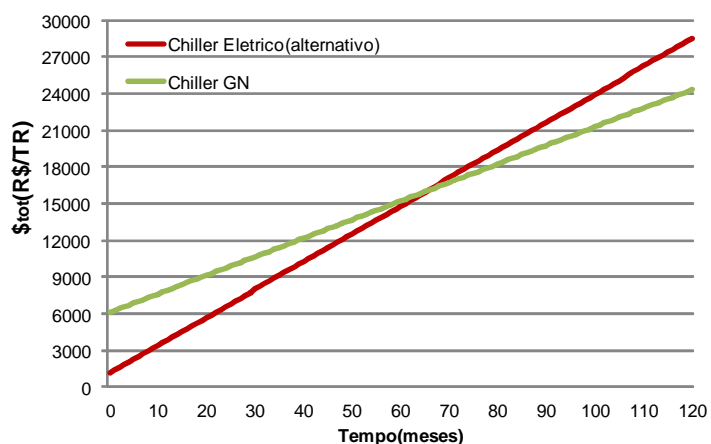
CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
CGOA-100 (100TR)	1138,75	227,98

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
BZY30 (100TR)	6114,09	151,76

tempo de retorno(meses)
65,3



6 - ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA (250TR)

CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

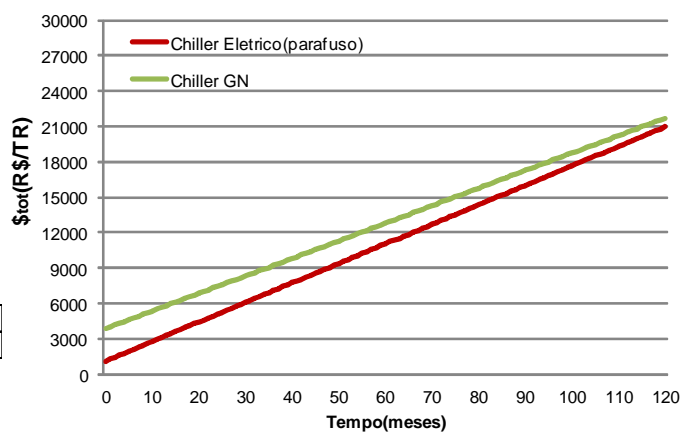
Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
RTWD-250 (250TR)	1145,9	165,2

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
BZY75 (250TR)	3886,9	148,6

tempo de retorno(meses)
165,4

Custo operacional ideal do GN	142,33 R\$/mês*TR
Tarifa ideal do GN	1,1324 R\$/m3



7 - ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA (500TR)

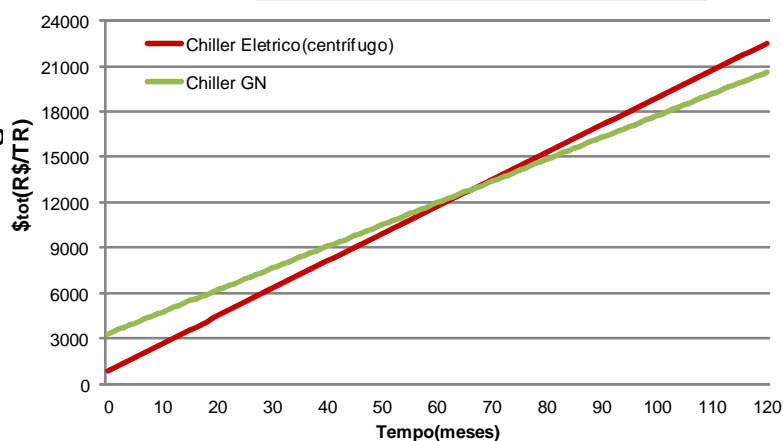
CHILLERS ELÉTRICOS (COMPRESSÃO)

Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
CVGF-500 (500TR)	893,4	180,2

CHILLERS A GÁS NATURAL (ABSORÇÃO)

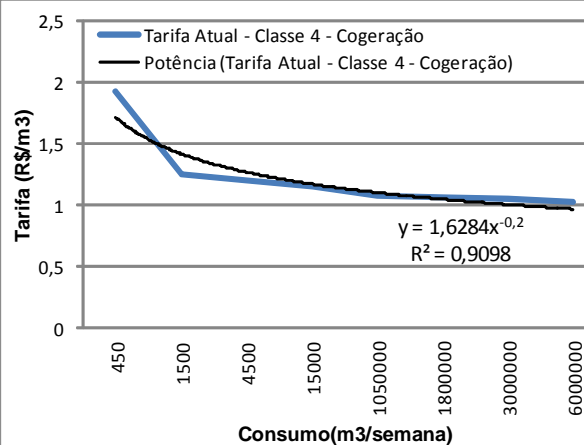
Modelo	\$in(R\$/TR)	\$op(R\$/mês*TR)
BZY150 (500TR)	3325,9	143,9

tempo de retorno(meses)
66,9



8 - ANÁLISE DA ESTRUTURA TARIFÁRIA DO GÁS NATURAL

Classe 4 - CO-GERAÇÃO - Consumo Semanal	Tarifa ATUAL (R\$/m ³)	Tarifa Proposta (R\$/m ³)
Consumo de 1 a 450 m ³	1,9304	1,8982
Consumo de 451 a 1500 m ³	1,2555	1,2346
Consumo de 1501 a 4500 m ³	1,1983	1,1783
Consumo de 4501 a 15000 m ³	1,1516	1,1324
Consumo de 15001 a 30000 m ³	1,1503	1,1311
Consumo de 30001 a 180000 m ³	1,1275	1,1087
Consumo de 180001 a 360000 m ³	1,1123	1,0938
Consumo de 360001 a 600000 m ³	1,09	1,0718



ANEXO A – Tarifas e preços finais de energia elétrica da Coelba - horosazonal verde A3A (30 a 44kV)



TABELA DE TARIFA E PREÇO FINAL DE ENERGIA ELÉTRICA RESOLUÇÃO 1.511 de 16.04.2013 (VIG- 22.04.2013) HOROSAZONAL - VERDE A3a (30 a 44 kV)

AGOSTO/2013 - PIS = 0,78% / COFINS = 3,62%

DESCRIÇÃO	TARIFA	ALÍQUOTAS		PREÇO FINAL
		ICMS	PIS/COFINS	AGOSTO/2013
A3a - COMERCIAL				
KWh NP - SECO	1,02567000	27%	4,40%	1,49514577
KWh NP - ÚMIDO	1,02567000	27%	4,40%	1,49514577
KWh FP - SECO	0,13089000	27%	4,40%	0,19080174
KWh FP - ÚMIDO	0,13089000	27%	4,40%	0,19080174
KVarh - NP/FP - SECO/UMIDO	0,11817000	27%	4,40%	0,17225947
kW / kVar	11,13000000	27%	4,40%	16,22448979
kW Ultrapassagem	22,26000000	27%	4,40%	32,44897959
A3a - INDUSTRIAL E COMERCIAL (Hotéis, Pousadas e Hospitais)				
KWh NP - SECO	1,02567000	12,96%	4,40%	1,24113020
KWh NP - ÚMIDO	1,02567000	12,96%	4,40%	1,24113020
KWh FP - SECO	0,13089000	12,96%	4,40%	0,15838576
KWh FP - ÚMIDO	0,13089000	12,96%	4,40%	0,15838576
KVarh - NP/FP - SECO/UMIDO	0,11817000	12,96%	4,40%	0,14299370
kW / kVar	11,13000000	12,96%	4,40%	13,46805421
kW Ultrapassagem	22,26000000	12,96%	4,40%	26,93610842
A3a - RURAL				
KWh NP - SECO	0,92310300	12,96%	4,40%	1,11701718
KWh NP - ÚMIDO	0,92310300	12,96%	4,40%	1,11701718
KWh FP - SECO	0,11780100	12,96%	4,40%	0,14254719
KWh FP - ÚMIDO	0,11780100	12,96%	4,40%	0,14254719
KVarh - NP/FP - SECO/UMIDO	0,11817000	12,96%	4,40%	0,14299370
kW	10,01700000	12,96%	4,40%	12,12124878
kVar	11,13000000	12,96%	4,40%	13,46805421
kW Ultrapassagem	22,26000000	12,96%	4,40%	26,93610842
A3a - RURAL COM BENEFÍCIO DA RES. 207/06 - IRRIGAÇÃO				
KWh NP - SECO	0,92310300	ISENTO	4,40%	0,96558891
KWh NP - ÚMIDO	0,92310300	ISENTO	4,40%	0,96558891
KWh FP - SECO	0,11780100	ISENTO	4,40%	0,12322280
KWh FP - ÚMIDO	0,11780100	ISENTO	4,40%	0,12322280
KWh RES SECO	0,01308900	ISENTO	4,40%	0,01369142
KWh RES ÚMIDO	0,01308900	ISENTO	4,40%	0,01369142
KVarh - FP/NP/RES - SECO/UMIDO	0,11817000	ISENTO	4,40%	0,12360878
kW	10,01700000	ISENTO	4,40%	10,47803347
kVar	11,13000000	ISENTO	4,40%	11,64225941
kW Ultrapassagem	22,26000000	ISENTO	4,40%	23,28451882
A3a - RURAL COM BENEFÍCIO DA RES. 207/06 - AQUICULTURA				
KWh NP - SECO	0,92310300	12,96%	4,40%	1,11701718
KWh NP - ÚMIDO	0,92310300	12,96%	4,40%	1,11701718
KWh FP - SECO	0,11780100	12,96%	4,40%	0,14254719
KWh FP - ÚMIDO	0,11780100	12,96%	4,40%	0,14254719
KWh RES SECO	0,01308900	12,96%	4,40%	0,01583857
KWh RES ÚMIDO	0,01308900	12,96%	4,40%	0,01583857
KVarh - FP/NP/RES - SECO/UMIDO	0,11817000	12,96%	4,40%	0,14299370
kW	10,01700000	12,96%	4,40%	12,12124878
kVar	11,13000000	12,96%	4,40%	13,46805421
kW Ultrapassagem	22,26000000	12,96%	4,40%	26,93610842
A3a - SERVIÇO PÚBLICO (NI Serv Água, Esgoto e Saneamento)				
KWh NP - SECO	0,87181950	18,36%	4,40%	1,12871504
KWh NP - ÚMIDO	0,87181950	18,36%	4,40%	1,12871504
KWh FP - SECO	0,11125650	18,36%	4,40%	0,14404000
KWh FP - ÚMIDO	0,11125650	18,36%	4,40%	0,14404000
KVarh - FP/NP/RES - SECO/UMIDO	0,11817000	18,36%	4,40%	0,15299067
kW	9,46050000	18,36%	4,40%	12,24818746
kVar	11,13000000	18,36%	4,40%	14,40963231
kW Ultrapassagem	22,26000000	18,36%	4,40%	28,81926462

ANEXO B – Tarifas de gás natural Bahiagás

RESOLUÇÃO AGERBA Nº. 02, de 01 de Abril de 2013, Vigência a partir de 01/08/2013.

Gás Natural - Tabela Tarifária - Preço de venda à vista

	Faixas de consumo semanal m ³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
	MIN	MAX	R\$/m ³	R\$/m ³
1 - Industrial				
	1	105	1,7975	2,2825
	106	350	1,0854	1,3783
	351	1050	1,0251	1,3017
	1051	3500	0,9757	1,2390
	3501	7000	0,9744	1,2373
	7001	42000	0,9503	1,2067
	Consumo por m ³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
2 - Automotivo			R\$/m ³	R\$/m ³
	Faixa única		0,8693	1,1039
	Faixas de consumo mensal m ³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
3 - Comercial	MIN	MAX	R\$/m ³	R\$/m ³
	1	450	2,0099	2,5523
	451	1500	1,1595	1,4724
	1501	4500	1,0875	1,3810
	4501	15000	1,0285	1,3060
	15001	30000	1,0269	1,3040
	30001	180000	0,9981	1,2674
	180001	360000	0,9789	1,2430
	360001	600000	0,9509	1,2075
	600001	1050000	0,9317	1,1831
	Faixas de consumo semanal m ³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS

4 - Co-geração Comercial	MIN	MAX	R\$/m³	R\$/m³
	1	450	1,5202	1,9304
	451	1500	0,9887	1,2555
	1501	4500	0,9437	1,1983
	4501	15000	0,9069	1,1516
	15001	30000	0,9059	1,1503
	30001	180000	0,8879	1,1275
	180001	360000	0,8759	1,1123
	360001	600000	0,8584	1,0900
	600001	1050000	0,8464	1,0748
	1050001	1800000	0,8357	1,0612
	Faixas de consumo semanal m³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
5 - Matéria-prima	MIN	MAX	R\$/m³	R\$/m³
	1	105	1,5202	1,9304
	106	350	0,9887	1,2555
	351	1050	0,9437	1,1983
	1051	3500	0,9069	1,1516
	3501	7000	0,9059	1,1503
	7001	42000	0,8879	1,1275
	42001	84000	0,8759	1,1123
	84001	140000	0,8584	1,0900
	140001	245000	0,8464	1,0748
	245001	420000	0,8357	1,0612
	Consumo por m³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
6 - GNC			R\$/m³	R\$/m³
	Faixa única		0,7341	0,9322
	Faixas de consumo mensal m³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
7 - Residencial	MIN	MAX	R\$/m³	R\$/m³
	1	20	1,9311	2,4522

	21	100	1,7009	2,1599
	101	850	1,5996	2,0312
	851	2500	1,5554	1,9751
	2501	-	1,5231	1,9341

* Gás nas condições de referência: Pressão de 1,033 kgf/cm², temp. 20 °C e PCS 9.400 Kcal/m³.

* Alíquota de ICMS de 12%, PIS de 1,65% e COFINS de 7,6%.

* A aplicação da Tarifa é feita em 'cascata', ou seja, progressivamente em cada uma das faixas de consumo.

ANEXO C – Instrução normativa número 162 da Receita Federal

Instrução Normativa SRF nº 162, de 31 de dezembro de 1998

Publicada no DOU de 07/01/1999, pág. 5

Fixa prazo de vida útil e taxa de depreciação dos bens que relaciona

O SECRETÁRIO DA RECEITA FEDERAL, no uso de suas atribuições e tendo em vista o disposto no art. 253, § 1º, do Regulamento do Imposto de Renda, aprovado pelo Decreto nº 1.041, de 11 de janeiro de 1994, resolve:

Art. 1º A quota de depreciação a ser registrada na escrituração da pessoa jurídica, como custo ou despesa operacional, será determinada com base nos prazos de vida útil e nas taxas de depreciação constantes dos anexos:

I - [Anexo I](#) : bens relacionados na Nomenclatura Comum do MERCOSUL - NCM; (Alterado pela [IN SRF nº 130/99, de 10/11/1999](#))

II - [Anexo II](#) : demais bens.

Art. 2º Esta Instrução Normativa entra em vigor na data de sua publicação.

EVERARDO MACIEL

Anexo I - Bens relacionados na Nomenclatura Comum do MERCOSUL - NCM			
Referência NCM	Bens	Prazo de vida útil (anos)	Taxa anual de depreciação
Capítulo 01	ANIMAIS VIVOS		
0101	ANIMAIS VIVOS DAS ESPÉCIES CAVALAR, ASININA E MUAR	5	20 %
0102	ANIMAIS VIVOS DA ESPÉCIE BOVINA	5	20 %
8414	BOMBAS DE AR OU DE VÁCUO, COMPRESSORES DE AR OU DE OUTROS GASES E VENTILADORES; COIFAS ASPIRANTES (EXAUSTORES*) PARA EXTRAÇÃO OU RECICLAGEM, COM VENTILADOR INCORPORADO, MESMO FILTRANTES	10	10 %
8415	MÁQUINAS E APARELHOS DE AR-CONDICIONADO CONTENDO UM VENTILADOR MOTORIZADO E DISPOSITIVOS PRÓPRIOS PARA MODIFICAR A TEMPERATURA E A UMIDADE, INCLUÍDOS AS MÁQUINAS E APARELHOS EM QUE A UMIDADE NÃO SEJA REGULÁVEL SEPARADAMENTE	10	10 %
8416	QUEIMADORES PARA ALIMENTAÇÃO DE FORNALHAS DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS, COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PULVERIZADOS OU DE GÁS; FORNALHAS AUTOMÁTICAS, INCLUÍDAS AS ANTEFORNALHAS, GRELHAS MECÂNICAS, DESCARREGADORES MECÂNICOS DE CINZAS E DISPOSITIVOS SEMELHANTES	10	10 %
8417	FORNOS INDUSTRIAIS OU DE LABORATÓRIO, INCLUÍDOS OS INCINERADORES, NÃO ELÉTRICOS <i>Ver Nota (1)</i>	10	10 %
8418	REFRIGERADORES, CONGELADORES ("FREEZERS") E OUTROS MATERIAIS, MÁQUINAS E APARELHOS PARA A PRODUÇÃO DE FRIO, COM EQUIPAMENTO ELÉTRICO OU OUTRO; BOMBAS DE CALOR, EXCLUÍDAS AS MÁQUINAS E APARELHOS DE AR-CONDICIONADO DA POSIÇÃO 8415	10	10 %