

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE COGERAÇÃO EM HOTÉIS

por

Eduardo Gus Brofman

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2014

ESTUDO DE COGERAÇÃO EM HOTÉIS

por

Eduardo Gus Brofman
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider: PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander: UNISINOS

Prof. Dr. Nathan Mendes: PUCPR

Prof. Dr. Rogério José Marczak
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, abril de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES pela bolsa de auxílio à pesquisa.

Agradeço aos hotéis que abriram suas portas para participar, com informações coletadas, na pesquisa realizada neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Paulo Beyer pelo conhecimento passado, durante todo tempo em que convivemos no meu período dentro da universidade.

Agradeço ao meu amigo e professor Paulinho pelos conselhos e apoio durante minha fase como estudante.

Agradeço a minha namorada Dani pelo carinho, compreensão e auxílio durante o período em que o trabalho foi realizado.

Agradeço a minha família: Gilberto, Diarna e Júlia por apoiarem e darem ouvidos durante tantas explicações e ensaios sobre este trabalho.

RESUMO

Este trabalho é um estudo da aplicação de um sistema que utiliza a cogeração para hotéis localizados na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil. Foi analisada a implantação desse tipo de sistema, também chamado de CHP (*Combined Heat and Power*), de um ponto de vista econômico e energético. A questão econômica foi determinada pela viabilidade através de métodos de análise quantitativa, neste caso, dando enfoque ao tempo de retorno do investimento. Para a análise energética foi realizado o estudo dos consumos e demandas anuais da operação do prédio através da ferramenta de simulação termo-energética de edificações. O *software* escolhido foi o EnergyPlus. Essas análises, energéticas e econômicas, foram realizadas através de uma comparação entre o hotel sem o sistema de CHP e o hotel com o sistema de CHP. O hotel hipotético simulado foi definido através de um levantamento de informações a respeito do desempenho energético de hotéis que funcionam em Porto Alegre. Além dos estudos energéticos e econômicos, foram realizadas variações em parâmetros do hotel para tentar abranger uma série de possíveis cenários e verificar suas viabilidades econômicas. Foi visto que a cogeração pode trazer redução de custo operacional mesmo não tendo um menor consumo energético anual. Em alguns cenários o tempo de retorno do investimento apresentou valor abaixo dos seis anos, sendo considerado como uma boa opção de investimento.

Palavras-chave: Cogeração; CHP; Simulação Termo-Energética de Edificações; EnergyPlus.

ABSTRACT

This work is a study of the application of a CHP (Combined Heat and Power) system in hotels built in the city of Porto Alegre, RS, Brazil. This system was analyzed from an economic and energetic point of view. The economic matter on its viability perspective was determined through quantitative methods, in this case, with the focus on the time frame for the investment's return. For the energetic analysis, a annual energy consumption and demand study was performed utilizing a whole-building energy model with computer simulation. The chosen software was EnergyPlus. The analyses, energetic and economic, were performed through a comparison between the hotel without the CHP system and with the CHP system. The hypothetic simulated hotel was determined by a data survey on the energetic performance of hotels build in Porto Alegre. In addition to the energetic and economic studies, some parametric variations to the hotel were made to include a series of possible scenarios and check their economic viability. It was observed that the CHP can provide some operational cost reductions even without presenting a lower annual energetic consumption. In some scenarios, the time to return the investment showed figures lower than six years, being considered a good investment option.

Keywords: Cogeneration; CHP; Whole-building energy model simulation; EnergyPlus.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Justificativa/Motivação.....	4
1.3 Revisão Bibliográfica.....	5
2 METODOLOGIA	10
2.1 Princípios de Cogeração.....	10
2.2 <i>Software</i> EnergyPlus.....	15
2.3 Modelos Matemáticos Assumidos na Simulação.....	17
2.4 Arquivo Climático e Temperatura da Água da Rede.....	19
2.5 Modelo de Funcionamento do MotoGerador com Cogeração.....	24
2.6 Modelo de Viabilidade Econômica.....	25
2.7 Ajuste de Curvas.....	27
3 DEFINIÇÃO DO HOTEL	29
3.1 Pesquisa de Consumo Energético em Hotéis de Porto Alegre.....	29
3.2 Modelo de Referência.....	36
3.3 Ajuste do Modelo de Referência com os Dados da Pesquisa.....	43
3.4 Modelo do Hotel com CHP.....	51
4 RESULTADOS	56
4.1 Comparação Energética.....	56
4.2 Viabilidade Econômica.....	69
4.3 Cenários Estudados.....	74
4.4 Ajuste de Curva para Representar os Resultados dos Diferentes Cenários.....	76
5 CONCLUSÃO	85
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	92
APÊNDICE B	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ciclos de CHP [adaptado de ASHRAE, 2008].....	11
Figura 2.2 - Cogeração junto ao ciclo de Rankine [adaptado de Brasil, 2005].....	12
Figura 2.3 - Grupo gerador [Waukesha, 2010].....	13
Figura 2.4 - Turbina à gás [Barja, 2006]	13
Figura 2.5 - Temperaturas de bulbo seco do arquivo climático de Porto Alegre	20
Figura 2.6 - Temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e umidade relativa em médias mensais	20
Figura 2.7 - Temperatura da água de rede definida pela correlação de Hendron et al., 2004 ..	23
Figura 2.8 - Temperatura da água de rede ajustada para o hemisfério sul	23
Figura 3.1 - Perfis anuais de consumo de energia elétrica	32
Figura 3.2 - Perfis anuais de consumo de combustível	33
Figura 3.3 - Médias mensais de consumo de energia elétrica	34
Figura 3.4 - Médias mensais de consumo de combustível	34
Figura 3.5 - Médias mensais de ocupação.....	35
Figura 3.6 - Geometria do hotel.....	41
Figura 3.7 - Modelo representativo	42
Figura 3.8 - Gráfico das simulações de ajuste de energia elétrica.....	46
Figura 3.9 - Gráfico das simulações de ajuste de consumo de combustível	47
Figura 3.10 - Perfil Anual de consumo de energia elétrica com linhas de tendência.....	48
Figura 3.11 - Perfil Anual de consumo de combustível com linhas de tendência.....	49
Figura 3.12 - Gráfico das eficiências do motogerador	54
Figura 3.13 - Gráfico das eficiências de produção de energia elétrica e eficiência total utilizando a cogeração	55
Figura 4.1 - Produção de energia do CHP	58
Figura 4.2 - Distribuição de frequências de operação do CHP	60
Figura 4.3 - Perfil de demanda de energia elétrica do dia 01 de Fevereiro	61
Figura 4.4 - Perfil de demanda de energia elétrica do dia 04 de Junho.....	61
Figura 4.5 - Perfil de demanda de gás natural do dia 01 de Fevereiro	62
Figura 4.6 - Perfil de demanda de gás natural do dia 04 de Junho	62
Figura 4.7 - Variação diária da temperatura da água do tanque	64

Figura 4.8 - Temperatura da água quente a cada <i>timestep</i> do modelo com CHP no dia 04 de Junho.....	65
Figura 4.9 - Consumos dos usos finais e produção de energia.....	66
Figura 4.10 - Consumos dos usos finais da energia mensais	67
Figura 4.11 - Consumo de aquecimento de água e produção de energia térmica	68
Figura 4.12 - Energia comprada	68
Figura 4.13 - Fluxo de caixa.....	71
Figura 4.14 - Fluxo de caixa com parcelas trazidas ao valor presente	72
Figura 4.15 - Comportamento do investimento sem tempo de retorno (taxa de desconto de 14,72 %)	73
Figura 4.16 - Comportamento do investimento para as diferentes taxas de desconto estudadas	74
Figura 4.17 - Sensibilidade da diferença de custo das fontes energéticas.....	78
Figura 4.18 - Sensibilidade da área do hotel	78
Figura 4.19 - Sensibilidade da taxa de desconto	79
Figura 4.20 - Dados com taxa de desconto de 7,44 %.....	80
Figura 4.21 - Dados com taxa de desconto de 9,02 %.....	80
Figura 4.22 - Dados com taxa de desconto de 10,92 %.....	81
Figura 4.23 - Dados com taxa de desconto de 12,82 %.....	81
Figura 4.24 - Dados com taxa de desconto de 14,72 %.....	82
Figura 4.25 - Dados com taxa de desconto de 7,44 % para valores de diferença de custo das fontes energéticas acima de R\$ 0,125	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Resultados de redução de consumo e emissão [adaptado de Smith, et al., 2013]...	6
Tabela 1.2 - Nível de intensidade de uso de energia [adaptado de Bohdnowicz, 2001]	9
Tabela 2.1 - Dados climáticos médios do arquivo climático.....	21
Tabela 2.2 - Temperaturas ambientes médias mensais do arquivo climático de Porto Alegre	22
Tabela 3.1 - Dados hotéis selecionados para pesquisa	30
Tabela 3.2 - Consumos mensais e anuais normalizados de energia elétrica	31
Tabela 3.3 - Consumos mensais e anuais normalizados de combustível	32
Tabela 3.4 - Dados do hotel modelo de referência	37
Tabela 3.5 - Ocupação média mensal de hotéis em Porto Alegre [adaptado de BEMTUR, 2012].....	37
Tabela 3.6 - Cargas internas	38
Tabela 3.7 - Dias de projetos utilizados [ASHRAE, 2009].....	40
Tabela 3.8 - Tarifa de energia elétrica utilizada [www.cee.com.br, acessado em 20/12/2012]	43
Tabela 3.9 - Simulações de ajuste de energia elétrica	45
Tabela 3.10 - Simulações de ajuste de consumo de combustível.....	46
Tabela 3.11 - Média das variações de consumo médio mensal para energia elétrica	50
Tabela 3.12 - Média das variações de consumo médio mensal para energia térmica	50
Tabela 3.13 - Dados ajustados de desempenho do motogerador [adaptado de Waukesha, 2010]	52
Tabela 3.14 - Dados dos gases de exaustão [Waukesha, 2010]	53
Tabela 3.15 - Coeficientes das equações ajustadas	53
Tabela 4.1 - Consumo total e líquido	57
Tabela 4.2 - Produção de energia do CHP.....	57
Tabela 4.3 - Eficiência na produção de energia do CHP	59
Tabela 4.4 - Eficiências das curvas de performance do CHP.....	59
Tabela 4.5 - Custos de instalação do CHP	69
Tabela 4.6 - Custos de operação do modelo de referência	70
Tabela 4.7 - Custos de operação do modelo com CHP	70

Tabela 4.8 - Resultados de VPL e TIR.....	71
Tabela 4.9 - <i>Payback</i> para diferentes taxas de desconto	72
Tabela 4.10 - Faixa de variação dos parâmetros	75
Tabela 4.11 - Diferença entre custo de energia elétrica e gás natural	76
Tabela 4.12 - Valores do primeiro ajuste de equação.....	77
Tabela 4.13 - Resultados dos ajustes	84
Tabela A.1 - Resultados dos Cenários Estudados	92
Tabela B.1 - Resultados do Teste da Equação 5.1.....	98
Tabela B.2 - Resultados do Teste da Equação 5.1 com Preço do Gás Subsidiado.....	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning
BLAST	Building Loads Analysis and Systems Thermodynamics
CEEE	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
CHP	Combined Heat and Power
CondFD	Conduction Finite Difference
COP	Coeficiente de Performance
CTF	Conduction Transfer Funtion
DOE	Departament of Energy
E.E.	Energia Elétrica
EMPD	Effective Moisture Penetration Depth Model
epw	EnergyPlus Weather
G.N.	Gás Natural
GLP	Gás Liquefeito do Pretoleo
HHV	Higher Heating Value
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
idf	Input Data File
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LHV	Lower Heating Value
MME	Ministério de Minas e Energia
O&M	Operação e Manutenção
PLR	Part Load Ratio
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PTHP	Package Terminal Heat Pump
TA	Termo Acumulação
TBS	Temperaturas de Bulbo Seco
TBU	Temperaturas de Bulbo Úmido

TIR	Taxa Interna de Retorno
TRY	<i>Test Reference Year</i>
U.R.	Umidade Relativa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USGBC	United States Green Building Council
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
VRF	Fluxo de Refrigerante Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
a_j	Coefficientes da equação ajustada
A_{si}	Área da superfície i da zona, m ²
c_j	Coefficientes de ajuste de curva
c_p	Calor específico do ar, J/(kg.K)
$Cp_{exhaust}$	Calor específico dos gases de escapamento, J/(kg.K)
C_z	Capacitância térmica do ar da zona, J/K
EEO	Potencia elétrica do CHP, W
EGT	Temperatura dos gases de escapamento do motor, K
E_{rec}	Taxa de energia recuperada dos gases de exaustão, W
FEI	Taxa de energia liberada pela queima do combustível, W
F_i	Fluxo de caixa no período i , R\$
$h_{c,si}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção na superfície i da zona, W/(m ² .K)
\dot{m}	Vazão de água do tanque de acumulação kg/s
$\dot{m}_{exhaust}$	Vazão mássica de gases do escapamento, kg/s
\dot{m}_{fuel}	Vazão mássica de combustível queimado pelo motor, kg/s
\dot{m}_i	Vazão mássica de ar proveniente da zona i ou adjacente, kg/s
\dot{m}_{inf}	Vazão mássica do ar de infiltração na zona, kg/s
NGC	Capacidade nominal do gerador, W
q_{heater}	Troca de calor dada pela queima do combustível (consumo energético do boiler), W
q_{net}	Transferência de calor no tanque de acumulação, W
$q_{offcycloss}$	Troca de calor do tanque com o ambiente fora de operação (é nula quando o boiler está funcionando), W
$q_{oncycloss}$	Troca de calor do tanque com o ambiente durante operação (é nula quando o boiler não está funcionando), W
q_{source}	Troca de calor por algum outro tipo de equipamento que forneça energia ao tanque (no modelo de referência é nula, porém quando utilizado o CHP é a energia

	disponibilizada pela recuperação de calor no moto-gerador), W
q_{use}	Troca de calor dada pelo uso de água quente dos chuveiros, W
R	Resíduo da diferença entre a função f^* e os dados observados
RJH	Taxa de energia aproveitada do fluido que refrigera as camisas dos pistões, W
$RLOH$	Taxa de energia aproveitada do óleo de lubrificação do motor, W
T_{∞}	Temperatura do ar exterior, °C
$T_{amb,avg}$	Temperatura ambiente média do dia, °C
TD	Taxa de desconto que será considerada, [%]
TEH	Taxa de energia aproveitada dos gases de escapamento do motor, W
$T_{exhaust}$	Temperatura em que os gases de escapamento saem do motor, K
T_{mains}	Temperatura da água, °C
$T_{out,avg}$	Média anual da temperatura do ar, °C
$T_{reference}$	Temperatura de referencia para a poder calorífico inferior, K
T_{sai}	Temperatura dos gases após a caldeira de recuperação, K
T_{si}	Temperatura da superfície i da zona, °C
T_z	Temperatura média do ar da zona, °C
T_{zi}	Temperatura média do ar da zona adjacente, °C
x_i	Valor x do dado observado para ajuste de curva
y_i	Valor y do dado observado para ajuste de curva
$\Delta T_{out,maxdiff}$	Máxima diferença entre médias mensais de temperatura da ar, °C
η_{rec}	Eficiência da caldeira de recuperação
$\Phi_j(x)$	Funções conhecidas e linearmente independentes do ajuste de curva

1 INTRODUÇÃO

No presente cenário em que a economia mundial tem alta taxa de crescimento, demandando recursos naturais para geração de energia e aumento de capacidade produtiva, é impossível não entrar na discussão sobre os impactos que esse crescimento gera para o planeta. Essas discussões tratam sobre a disponibilidade dos recursos, sobre suas divisões em recursos renováveis e não renováveis, sobre o impacto que a utilização destes recursos gera e principalmente sobre quais são as medidas que devemos tomar para evitarmos futuros catastróficos. No ano de 2012 foi realizado um evento mundial em que um dos temas discutidos foi essa questão de uso de recursos naturais para produção energética e seus impactos, o evento foi chamado de Rio+20. Outro ponto que é muito importante ser levado em consideração, quando se trata da utilização dos recursos para produção de energia, é a questão econômica. Muitos dos recursos naturais se tornaram commodities e tem valores flutuantes no mercado.

Uma medida que tem sido utilizada, levando em consideração o impacto da utilização dos recursos naturais, é a redução e a efficientização do uso da energia. Cada país tem sua estratégia para motivar os setores econômicos a utilizarem com inteligência a energia disponível. No Brasil foi criado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), hoje administrado pela Eletrobrás. Esse programa tem o intuito de promover o uso racional e eficiente de energia em diferentes segmentos da sociedade através da disseminação de informações qualificadas sobre o tema.

Aliado ao tema da preservação de recursos naturais está um conceito do qual vem se falando cada vez mais que é a sustentabilidade. Esse conceito está sendo aplicado em diferentes setores da economia com o objetivo de reduzir o impacto que estes setores geram ao nosso planeta e permitir que gerações futuras possam continuar usufruindo de todos recursos que temos disponíveis. Quando se trata de sustentabilidade é fundamental falar do uso racional e eficiente de energia.

Dentro do mercado da construção civil, a sustentabilidade vem ganhando muito espaço nos últimos anos. Este setor, desde projeto, construção e operação, consome mais de 30% da matriz energética e mais de 60% da energia elétrica utilizada nos Estados Unidos [LEED, 2009], país este que tem um dos maiores consumos de energia elétrica per capita do mundo [ANEEL, 2008].

Com a ideia de reduzir estes impactos causados pela construção civil, foram surgindo selos, certificados e normas que qualificam os empreendimentos como sustentáveis ou simplesmente eficientes energeticamente. É o caso da certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), desenvolvida pelo U.S. Green Building Council (USGBC). Dentro desta certificação, que funciona como um sistema de pontuação, a parte referente a energia equivale a 35 pontos dos 100 possíveis [LEED, 2009]. No Brasil, foi desenvolvido pela Eletrobrás, em parceria com o INMETRO, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA) que funciona como um selo identificando o nível de eficiência energética do prédio e possibilitando que o consumidor tenha melhores condições de avaliar este quesito.

O setor de hotelaria é um mercado dependente da construção civil no que diz respeito a novos empreendimentos e *retrofits*, que tem alto potencial de crescimento no Brasil devido a futuros eventos que serão realizados, no caso a Copa do Mundo de Futebol e as Olimpíadas. Estima-se que, nos anos anteriores ao da Copa do Mundo, o setor seja acrescido em 38.854 novos quartos considerando que 238 novos empreendimentos sejam lançados [HOTELNEWS, 2012], sendo que a maior concentração desses hotéis serão nas cidades-sede dos jogos.

Um hotel é um empreendimento construído e operado normalmente com fins lucrativos, por tanto deve apresentar um bom gerenciamento e administração financeira para trazer o retorno esperado aos seus investidores. Dentre outras despesas, a conta de energia representa um importante gasto que será gerido pela administração do prédio. Os principais consumos energéticos que um hotel apresenta se dão pela energia elétrica e, dependendo do tipo de sistema de aquecimento de água, pela energia térmica utilizada para aquecê-la. O consumo de um hotel pode chegar a níveis de 365 kWh/m² por ano em hotéis de grande porte [Bohdanowicz, et al., 2001]. Considerando um hotel de 20.000 m² e o preço do kWh em torno de R\$ 0,30, o custo anual em energia fica próximo aos 2 milhões de reais. Com esses dados pode-se ter uma ideia de quão importante é a escolha certa de sistemas que utilizem eficientemente a energia, sem levar em consideração a questão sustentável para a racionalização dos recursos naturais. Os principais sistemas que geram o consumo energético em um hotel são: sistema de ar condicionado, elevadores, sistema de iluminação e sistema de aquecimento de água.

Um tipo de solução para sistemas energéticos que busca um alto nível de eficiência energética é a cogeração. Trata-se da produção simultânea de energia elétrica ou mecânica e térmica a partir de uma mesma fonte energética [ASHRAE, 2008]. Esse tipo de solução deve apresentar um estudo muito bem elaborado para sua aplicação, levando em consideração necessidades técnicas mas principalmente viabilidade econômica. A cogeração pode funcionar com diferentes fontes de energia e pode diversificar a matriz energética do empreendimento que decidir por esta aplicação. Então muitos fatores como: demanda de energia elétrica e térmica, horários de picos de demanda e tarifas de energia devem ser considerados na hora de realizar as análises para aplicação de um sistema de cogeração em um empreendimento. A identificação desta vasta necessidade de estudos criou a oportunidade para a realização deste presente trabalho, onde foi analisada a aplicação da cogeração em empreendimentos do setor hoteleiro.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade econômica da implantação de um sistema que utilize a cogeração. Foi estudada a utilização desse sistema aplicado em hotéis localizados na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil. Para cumprir esse objetivo foi necessário estabelecer um estudo do consumo energético de hotéis, hoje construídos e operando em Porto Alegre, para definir um padrão de consumo de energia elétrica e térmica desses empreendimentos. Com o objetivo de mostrar a viabilidade econômica de diferentes cenários na construção de um novo empreendimento hoteleiro em Porto Alegre, o produto do trabalho foi a compilação de uma série de resultados produzindo uma equação ajustada que possa vir a ser utilizada em futuras análises.

Uma área de pesquisa que vem sendo muito desenvolvida quando se trata de sustentabilidade e construção civil é a simulação de desempenho termo-energético de edificações. É uma ferramenta que possibilita profundas análises em relação ao comportamento térmico e desempenho energético de um prédio. Utiliza-se um *software* que compreende uma série de modelos matemáticos que representam o real comportamento térmico das edificações. Esse tipo de análise vem sendo estudada por profissionais e pesquisadores das áreas de Engenharia Civil, Engenharia Mecânica e Arquitetura com o intuito de tornar os futuros prédios e os que venham a ser reformados mais eficientes

energeticamente. Dentro do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) essa área vem sendo pesquisada desde os anos 90.

Aliado ao objetivo principal deste trabalho, todas as análises energéticas foram realizadas utilizando a ferramenta de simulação energética para se chegar nos resultados mais precisos possíveis. O objetivo secundário do trabalho foi utilizar modelos de cogeração e entender seu funcionamento dentro do *software* de simulação. O *software* escolhido para ser utilizado neste trabalho foi o EnergyPlus.

1.2 Justificativa/Motivação

Quando se trata dessas questões de racionalização e uso eficiente de energia, citadas no texto anteriormente, a engenharia exerce um papel fundamental em trazer soluções práticas e com maior nível de tecnologia. Os engenheiros envolvidos nos setores que demandam soluções mais eficientes e tecnológicas devem trabalhar para atender essas solicitações do mercado. Essas soluções devem ser estudadas e desenvolvidas no meio acadêmico para que possam ser aplicadas com conhecimento na indústria em que serão utilizadas. Essa necessidade de novas soluções e conhecimento de tecnologia é um dos principais motivos para a realização deste presente trabalho.

Além da importância de se estudar e desenvolver novas tecnologias de aplicação na engenharia, é muito importante uma boa análise de viabilidade econômica de sua implantação. O acoplamento da análise energética de um sistema com a análise financeira também estimulou este trabalho com um caráter investigativo para saber da real possibilidade de utilizar-se a cogeração como alternativa.

Outra motivação para a realização deste estudo foi a aplicação de um modelo complexo na simulação termo-energética da edificação. O modelo utilizado para cogeração apresenta alta qualidade e complexidade de *input* de dados para se ter bons resultados. Considerando que essa ferramenta de simulação computacional é tecnologia de ponta para esse tipo de análise, foi muito importante estudar e dominar o modelo utilizado para simular a cogeração acoplada à demanda elétrica e térmica do hotel.

Por último e não menos importante o estudo da cogeração foi um grande estímulo, pois se trata de uma solução pouco utilizada no mercado hoteleiro da cidade de Porto Alegre, mas pode ser uma aplicação muito interessante na questão de maior aproveitamento da

energia gasta, redução de custo operacional e diversificação da matriz energética. Com preços flutuantes de energia elétrica e combustíveis, essa tecnologia pode ser tornar muito atrativa na questão financeira. Foi visto que alguns empreendimentos já utilizam unidades geradoras para alterar a fonte energética em horários que suas tarifas ficam mais caras, nesses casos a aplicação da cogeração teria maior facilidade de implantação técnica e boa viabilidade econômica.

1.3 Revisão Bibliográfica

A revisão da literatura realizada para a pesquisa deste trabalho foi direcionada a aplicação de CHP em edificações: prédio residenciais, comerciais e hotéis, para entender como este tipo de tecnologia tem sido estudada academicamente e aplicada no mercado. Como neste trabalho foi realizada uma pesquisa para entender o consumo energético de hotéis construídos em Porto Alegre, buscou-se na literatura trabalhos com pesquisas similares a esta. Por último foram revisados trabalhos que falam de simulação de desempenho termo-energético de edificações para se conhecer os *softwares* e metodologias que o meio acadêmico tem utilizado nesta área.

Para se avaliar o potencial de instalação de um sistema de CHP, como já foi citado no texto anteriormente, é muito importante se conhecer as demandas energéticas do estabelecimento. Também é necessário um bom estudo do custo de combustível e as tarifas de energia elétrica, tanto no que refere a seu custo como a estrutura tarifária contratada à concessionária. A partir desses dados pode-se definir a configuração e o dimensionamento necessário da central cogeneradora.

Estabelecimentos do setor hoteleiro podem ter altas demandas de energia elétrica e energia térmica. A energia elétrica atende o sistema de iluminação, sistema de ar condicionado, elevadores e equipamentos elétricos em geral. A energia térmica é utilizada para aquecimento da água utilizada em chuveiros e torneiras, mas também pode ser utilizada para vapor em cozinhas e lavanderias. Dependendo da classe do hotel também pode haver grande demanda térmica para aquecimento de piscina e sauna. Em países de clima frio, o sistema de calefação também pode demandar água quente.

Nos Estados Unidos, onde a tecnologia da cogeração é bastante difundida, existiria um potencial de instalação em centrais de CHP de 17 GW em 2010 com previsão de crescimento

para 35 GW até 2020 [Midwest CHP Application Center, 2005]. Este potencial está baseado na instalação de sistemas que devem ter um tempo de retorno do investimento inferior a dez anos se comparado a instalação de um sistema convencional de HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) e a compra de energia elétrica da rede distribuidora. Esses dados foram determinados em uma pesquisa realizada pela Resource Dynamics Corporation e apresentado ao Department of Energy (DOE), onde se constatou que os estabelecimentos com maior potencial para a cogeração foram: prédios de escritório, hospitais, colégios e hotéis. Em hotéis o potencial fica em torno dos 2 GW de potência instalada. No Brasil, a tendência é que este potencial se restrinja a hotéis e hospitais pelas demandas necessárias com os sistemas que costuma-se utilizar e pelo clima do país.

O regime de operação em que o sistema deve operar é muito importante ser definido conforme as necessidade energéticas do estabelecimento, estruturas tarifárias e funcionamento dos equipamentos que compõem o CHP. É um parâmetro que pode ter muita influência na viabilidade econômica da implantação. No caso da operação *base load*, onde o sistema funciona sempre em capacidade constante, foi mostrado que a utilização de um sistema de termo acumulação (TA) acoplado à cogeração pode aumentar as reduções de custo operacional e de emissões de gases para a atmosfera. No caso onde a TA tem capacidade para acumular a capacidade máxima da produção de energia térmica, obteve-se uma redução de 14 % do consumo de energia e 18 % da emissão CO₂ [Smith, et al., 2013]. Os resultados de redução com outras capacidades da TA podem ser vistos na tabela abaixo.

Tabela 1.1 - Resultados de redução de consumo e emissão [adaptado de Smith, et al., 2013]

	Sem TA	25 % Qmax.	50 % Qmax.	75 % Qmax.	Qmax.
Consumo Energético	12,0%	12,5%	13,0%	13,5%	14,0%
Emissões de CO ₂	16,5%	17,0%	17,5%	18,0%	18,0%

A simulação de desempenho termo-energético de edificações é uma ferramenta que tem sido cada vez mais utilizada para a construção de prédios mais eficientes energeticamente. A análise que essa ferramenta possibilita, tem atraído todos os profissionais envolvidos na área desde os engenheiros aos executivos que investem dinheiro na construção e operação dos empreendimentos. Além de permitir prever soluções que são consideradas aliadas da sustentabilidade, pelo seu baixo consumo de energia, a simulação permite que os

ganhos da aplicação dessas soluções sejam mensurados da maneira mais precisa possível. As certificações e selos que hoje existem para qualificar um prédio como sustentável ou energeticamente eficiente, já veem o valor da simulação e costumam exigir sua utilização como parte da análise feita para que os empreendimentos recebam esses certificados. Além de servir para a obtenção de selos, essa ferramenta tem se tornado parte do processo de um projeto desde as primeiras fases até os projetos executivos. É uma excelente opção para a tomada de decisão na hora da definição de sistemas, materiais construtivos, orientação solar e outros componentes que fazem parte de um projeto.

Afonso, 2011 utilizou a simulação através do *software* EnergyPlus para analisar o efeito da infiltração de umidade nas paredes de uma escola. Foram testados diferentes materiais higroscópicos, os quais absorvem umidade, para reduzir a umidade dentro dos ambientes da edificação. Foi estudada a influência da umidade relativa dentro dos ambientes em função de diferentes propriedades como: condutividade global dos vidros e das paredes e inércia higroscópica das paredes [Afonso, 2011]. No caso do trabalho realizado por Afonso, 2011, não se trabalhou com o desempenho energético e sim com o comportamento térmico da edificação. Esse tipo de análise é outra possibilidade que a simulação permite, quando o estudo está focado em conforto térmico, esta passa a ser uma excelente opção.

Para uma comparação entre a utilização de uma central de micro cogeração e a utilização de um sistema tradicional de aquecimento de água com um boiler a gás e eletricidade proveniente da rede de distribuição, Dorer, 2009, utilizou a simulação com o *software* TRNSYS para analisar a redução de consumo vindo de fontes não renováveis e a emissão de CO₂ equivalente. A redução de consumo energético chegou a 14 % com o sistema de cogeração, se tratando de fontes de energia não renováveis. Já para a emissão de carbono equivalente se atingiu uma redução de até 22 % [Dorer, 2009].

Pozza, 2011 utilizou o EnergyPlus para estudar algumas alterações no envoltório de uma casa localizada em uma zona bioclimática que compreende as cidades mais frias do Brasil. Também estudou a substituição do sistema de ar condicionado focando na redução de consumo de energia elétrica. Para envoltório foi proposto a utilização de vidros duplos, superfícies com cores de maior absorvidade, lã de vidro nas paredes internas e externas e EPS (Poliestireno Expandido) no piso da casa. Com essas soluções obteve-se uma redução de 18,2 % do consumo total de energia elétrica, e viu-se que o consumo do sistema de ar condicionado representa um total de 29,6 % desse consumo. Para o sistema de HVAC foi

proposto um sistema de VRF (fluxo de refrigerante variável) comparado com um sistema de *splits*. Com essa substituição, a simulação mostrou uma redução de 9,3 % do consumo total de energia elétrica.

Carlo, 2008 utilizou a simulação com o *software* EnergyPlus para caracterizar o consumo de edificação não residenciais em relação a volumetria e propriedades de envoltório delas. Foram ajustadas equações através de regressões lineares que relacionam o consumo de energia com área, volume, condutividade térmica, área envidraçada e ângulo de sombreamento do envoltório de uma serie de diferentes edificações.

Como é necessário ter um adequado conhecimento das demandas de energia elétrica e térmica do estabelecimento em que se está propondo um sistema de CHP, uma boa maneira de prever estas demandas se dá caracterizando as demandas de prédios similares na mesma localidade. Para isso pode-se realizar uma pesquisa de desempenho energético de edificações, onde devem ser levantadas uma série de características como: equipamentos e sistemas que demandam energia, área construída, número de pessoas que circulam no prédio, perfil de ocupação diária e mensal, consumo anual de energia térmica e consumo anual de energia elétrica.

Priyadarsini, 2009 realizou um estudo baseado em uma pesquisa levantando a performance energética de hotéis em Singapura. Foram pesquisados 29 hotéis em uma pesquisa nacional. A intensidade de uso de energia média atingiu um valor de 427 kWh/m² por ano, contabilizando energia elétrica e térmica. As características levantadas na pesquisa para se estabelecer um padrão de intensidade de uso de energia foram: área construída, ano de construção, número de quartos, presença de lavanderia e piscina, número de funcionários e consumo anual de energia elétrica, gás e Diesel.

Bohdnowicz, 2001 mostrou alguns dados de consumo anual médio de hotéis em diferentes cidades do mundo. Os dados foram coletados nas seguintes cidades: Londres, Ottawa, Oslo, Hong Kong, e dados médios nos Estados Unidos e Suécia. Os consumos médios (kWh/m² por ano) foram de 322, 689, 282, 401, 564 e 100 a 200, respectivamente. Foi estabelecido um nível de eficiência energética dependendo do tamanho do hotel conforme a tabela abaixo:

Tabela 1.2 - Nível de intensidade de uso de energia [adaptado de Bohdnowicz, 2001]

	Bom	Médio	Ruim	Muito Ruim
Hotéis Grandes (Mais de 150 quartos)				
Energia Elétrica (kWh/m ² .ano)	<165	165-200	200-250	>250
Combustível (kWh/m ² .ano)	<200	200-240	240-300	>300
Total (kWh/m ² .ano)	<365	365-440	440-550	>550
Hotéis de Tamanho Médios (50-150 quartos)				
Energia Elétrica (kWh/m ² .ano)	<70	70-90	90-120	>120
Combustível (kWh/m ² .ano)	<190	190-230	230-260	>260
Total (kWh/m ² .ano)	<260	260-320	320-380	>380
Hotéis Pequenos (4-50 quartos)				
Energia Elétrica (kWh/m ² .ano)	<60	60-80	80-100	>100
Combustível (kWh/m ² .ano)	<180	180-210	210-240	>240
Total (kWh/m ² .ano)	<240	240-290	290-340	>340

2 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas todas as metodologias utilizadas para se chegar aos resultados do trabalho. O trabalho foi composto por quatro diferentes etapas: a primeira delas foi uma pesquisa de desempenho energético de hotéis localizados em Porto Alegre (descrita no capítulo 3); na segunda etapa foi realizada uma análise termo-energética comparando o caso base (hotel considerado, neste trabalho, como padrão de mercado em Porto Alegre) com a proposta de um sistema de CHP aplicado ao caso base; na terceira etapa foi realizado uma análise de viabilidade econômica do sistema com a cogeração e, por último, na quarta etapa, foi realizado um ajuste de uma equação que representa os resultados de viabilidade econômica dos diferentes cenários simulados, variando a área do hotel, taxa de juros e tarifas de energia elétrica e combustível. A seguir são apresentados: o *software* de simulação que foi utilizado e as equações utilizadas, os modelos matemáticos para análise de viabilidade econômica e ajuste de equações através de regressões.

2.1 Princípios de Cogeração

Cogeração é definida como a produção simultânea de energia elétrica ou mecânica e energia térmica utilizável, a partir de uma única fonte de energia. Utilizando a energia de uma corrente que normalmente seria rejeitada, a cogeração pode proporcionar uma eficiência maior que os níveis atingidos quando calor ou potência elétrica são produzidos separadamente. Com a cogeração pode-se chegar a eficiências de 50 % a 70 % ou até mais, [ASHRAE, 2008].

A cogeração pode funcionar em dois tipos de ciclos, os chamados de ciclo *topping* e os ciclos *bottoming* que se diferenciam pela ordem de produção das energias elétrica e térmica conforme descrito abaixo:

- **Ciclo *topping***: Neste ciclo a energia disponibilizada na queima do combustível produz primeiramente potência de eixo ou energia elétrica. O calor rejeitado pela queima é então aproveitado na forma de energia térmica para seu devido uso final.

- **Ciclo *bottoming***: Neste ciclo a queima do combustível é realizada primeiramente para a produção de energia térmica de alto nível e as sobras dessa energia são aproveitadas para a produção de trabalho de eixo ou energia elétrica.

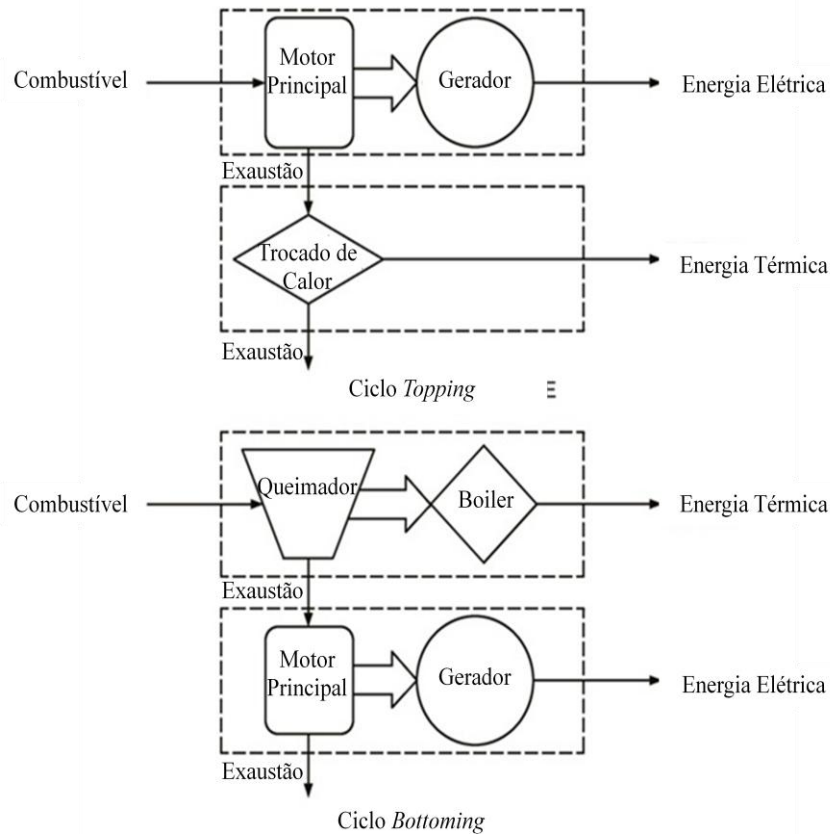


Figura 2.1 - Ciclos de CHP [adaptado de ASHRAE, 2008]

Há uma série de maneiras de se configurar uma central cogeneradora, dependendo das demandas energéticas pode-se montar a cogeração para melhor atender essas necessidades. Para isso é muito importante conhecer o tamanho da demanda de energia e qual será a utilização em seu uso final. Uma possível configuração para se atender um prédio que tenha demanda de energia elétrica e energia térmica, essas vindo dos equipamentos elétricos, iluminação, sistema de ar condicionado e aquecimento de água, poderia ser: um moto-gerador com motor de combustão interna para produção de energia elétrica e o aproveitamento dos gases da combustão e calor de arrefecimento do motor para aquecimento de água em um boiler. Nesse caso seria um ciclo *topping*. Uma pequena variação para este caso seria

aproveitar os gases de escapamento do motor para fazer funcionar um *chiller* de absorção e usar apenas o calor de arrefecimento para aquecer água.

Uma outra possível configuração de cogeração muito utilizada em usinas de produção de energia elétrica é a cogeração inserida em um ciclo Rankine. Onde existe uma caldeira geradora de vapor que passa por uma turbina acoplada a um gerador. O vapor que sai da turbina é utilizado para atender a demanda de energia térmica da planta [Brasil, 2005]. A figura abaixo mostra essa possível configuração.

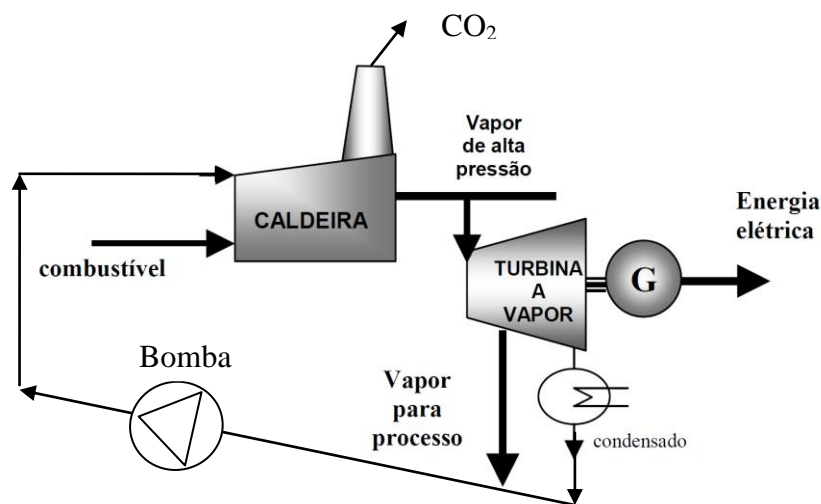


Figura 2.2 - Cogeração junto ao ciclo de Rankine [adaptado de Brasil, 2005]

É importante mencionar alguns dos principais equipamentos que compõe uma central cogeneradora. Esses equipamentos serão utilizados dependendo da configuração adotada e do tipo de ciclo de CHP. Primeiramente, o equipamento mais importante é o chamado de motor principal (*Prime Mover*) que tem o objetivo de converter a energia disponibilizada pela queima do combustível em trabalho de eixo e que normalmente estará ligado ao gerador elétrico. Os motores principais mais utilizados são [CHP Resource Guide, 2005]:

- **Motores alternativos de combustão interna:** Uma das tecnologias mais utilizadas, disponíveis em uma faixa de capacidade de 5 kW até 10 MW. Funcionam bem acompanhando a demanda (oscilando sua capacidade) e em cargas parciais. Possuem um bom aproveitamento da energia para produção de energia elétrica podendo chegar a 40% da energia do combustível [Brasil, 2005], por tanto são uma boa opção quando se tem uma alta demanda de energia elétrica. A energia térmica produzida se apresenta nos gases de escapamento, água de arrefecimento e no óleo de lubrificação.

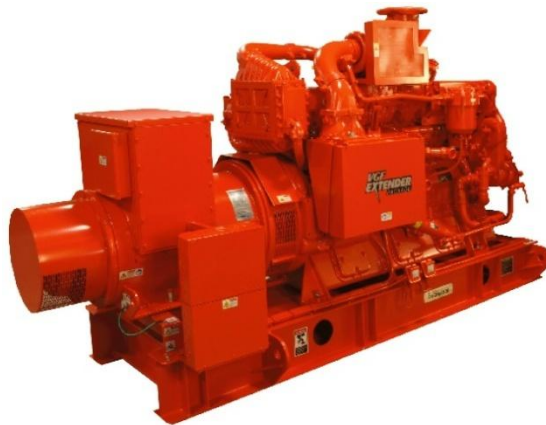


Figura 2.3 - Grupo gerador [Waukesha, 2010]

- **Turbinas à gás:** Também umas das tecnologias mais utilizadas para motor principal em plantas cogeneradoras, servem para aplicações de maiores capacidades, acima de 4 MW. Sua faixa de capacidade varia de 500 kW até 100 MW. Têm bom funcionamento em regime chamado de *base load*, onde trabalham a uma potência constante, mas também podem funcionar oscilando sua potência para acompanhar a demanda energética. Têm como uma principal vantagem em relação aos motores de combustão interna o baixo nível de emissão de NO_x .

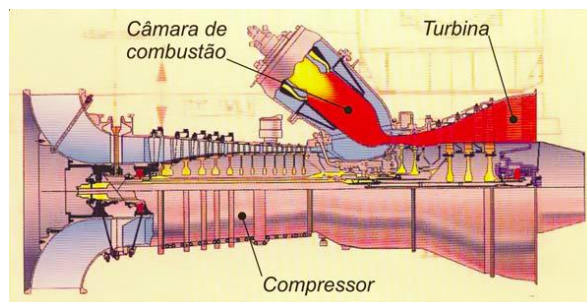


Figura 2.4 - Turbina à gás [Barja, 2006]

- **Microturbinas:** São turbinas à gás de pequeno porte com capacidade variando de 25 kW a 400 kW. Baixa necessidade de manutenção pela pequena quantidade de peças móveis. Têm alto potencial de utilização em prédios comerciais, principalmente onde há demanda de água quente de serviço. Sua eficiência de conversão em energia elétrica varia de 25 % a 30 %.

- **Turbinas a vapor:** São equipamentos que transformam a energia contida no vapor em trabalho de eixo. São utilizadas para plantas de grande capacidade variando de 1 MW até 500 MW. Essa tecnologia de motor principal é normalmente utilizada em ciclos *bottoming* de cogeração.

- **Células combustíveis:** Essa tecnologia é diferente dos equipamentos mencionados anteriormente. Ao invés de primeiramente produzir trabalho de eixo elas produzem diretamente eletricidade e calor através de reações eletroquímicas. São silenciosas e consideradas as mais limpas para o meio ambiente quando se trata de cogeração. Possuem capacidade variando de poucos kW até 250 kW.

Um equipamento que não é considerado um motor principal mas é de fundamental importância quando se trata de ciclos *bottoming* é o gerador de vapor. Este realiza a queima do combustível para produção de energia térmica que, após seu uso primário, será recuperada para produção de energia elétrica ou mecânica. Existem outros equipamentos secundários que devem compor as centrais de CHP, dependendo de sua configuração, como: gerador de energia elétrica, que converte trabalho de eixo em eletricidade; inversores de frequência, que convertem corrente elétrica de direta para alternada; recuperadores de calor, que são trocadores de calor onde se aproveita a energia térmica rejeitada pelos motores principais para seus devidos usos finais; e, por último qualquer tipo de instalação elétrica e hidráulica para acoplar a produção de energia realizada na central cogeneradora até seus usuários finais.

A cogeração tem aplicação em vários diferentes setores da sociedade. Dependendo das demandas necessárias de energia térmica e eletricidade a cogeração pode ter um bom retorno financeiro ao seu usuário e ser uma boa opção. A análise da quantidade dessas demandas e o nível de temperatura que é necessário devem ser muito bem estudados para definir qual a melhor configuração e dimensionar corretamente as centrais cogeneradoras.

No setor industrial, onde existe uma grande demanda de energia térmica em forma de vapor para acionamento de turbinas ou aquecimento de água e também uma grande demanda de energia elétrica, a cogeração pode ser uma boa solução. A indústria do petróleo petroquímica e química possui uma alta aplicabilidade para a cogeração [Brasil, 2005].

No setor da construção civil, a aplicação da cogeração se dá na operação de prédios. Hospitais, hotéis, prédios residenciais e comerciais demandam energia elétrica e podem

demandar energia térmica. No Brasil, prédios comerciais normalmente não demandam energia térmica pois não utilizam água quente para banho e a calefação é realizada através de ciclos reversos do sistema de ar condicionado. Porém hotéis, hospitais e prédios residenciais demandam energia para aquecimento de água, nesses casos a cogeração passa a se tornar interessante. Uma questão importante e que pode tornar uma central de CHP atrativa é a questão da tarifação horosazonal de energia elétrica. Nos horários chamados de pico, a energia elétrica fica bem mais cara comparada à tarifa do combustível que alimentaria o sistema de CHP. Com essa tarifa a viabilidade econômica da utilização desse sistema passa a ser mais interessante. Neste presente trabalho esse regime de operação foi explorado especificamente na sua aplicação em hotéis.

2.2 Software EnergyPlus

O *software* utilizado para a simulação termo-energética do hotel foi o EnergyPlus na versão 8.1. O EnergyPlus é um programa de análise de consumo energético de edificações capaz de modelar as 8760 horas de um ano com variações de ocupação, potência de iluminação, equipamentos, sistema de HVAC, efeitos de inércia térmica e é validado pela norma ASHRAE 140. O programa é capaz de modelar aquecimento, arrefecimento, ventilação e outras correntes energéticas levando em consideração os consumos de energia e calculando as cargas térmicas necessárias para se atingir as temperaturas estabelecidas em controle.

O EnergyPlus foi criado a partir da junção de outros dois programas mais antigos de simulação: o DOE-2 e o BLAST (*Building Loads Analysis and Systems Thermodynamics*). Escrito em linguagem Fortran 90, reúne uma série de características e modelos dos seu antecessores. Ambos o DOE-2 e o BLAST foram desenvolvidos nos anos 70 quando as crises energéticas já faziam com que as pessoas comesçassem a levar em consideração a necessidade de prédios mais eficientes [Pozza, 2011].

Dentre as inúmeras capacidades que o software leva em consideração nos seus modelos e é capaz de simular, além de algumas básicas já descritas anteriormente, estão:

- Solução simultânea e integrada, onde a resposta do prédio e os sistemas primários e secundários estão acoplados.

- Intervalos de tempo definidos pelo usuário com subdivisões horárias para as interações entre HVAC e as zonas térmicas (automaticamente e internamente variados para garantir a estabilidade numérica da solução).
- Arquivos climáticos, dados de entrada e saída com intervalos horários e subdivisões definidas pelo usuário;
- Soluções de carga térmica de edificação baseadas em técnicas de balanço térmico que permitam cálculos simultâneos de efeitos radiantes e convectivos em superfícies externas e internas;
- Condução de calor transientes através dos elementos da edificação, como paredes, pisos e tetos usando as funções de transferência por condução;
- Transferência de calor através do solo com modelos tridimensionais por diferenças finitas e soluções analíticas simplificadas;
- Transferência de calor e massa combinadas que contabilizam absorção e eliminação de umidade inseridas na função transferência ou utilizando um modelo chamado de *Effective Moisture Penetration Depth Model* (EMPD);
- Modelos de conforto térmico baseados no nível de atividade, temperaturas de bulbo seco e umidade;
- Modelos de céu anisotrópico para melhoria nos cálculos de radiação solar difusa e em superfícies inclinadas;
- Cálculos avançados para as fenestrações como vidros, janelas, portas, incluindo controle de cortinas e balanço de energia por camada de vidros disponíveis comercialmente;

- Controle de iluminação natural com cálculos de iluminância interna, controle por ofuscamento, controle de luminárias, e efeito nas cargas térmicas com alteração da iluminação artificial;

- Cálculo de poluição atmosférica que prevê a produção de CO₂, SO_x, NO_x, CO, materiais particulados e hidrocarbonetos com geração no local, remota e conversão de energia.

O EnergyPlus trabalha com um arquivo de entrada de dados com extensão ".idf" (*Input Data File*). Antes de se começar a trabalhar com a interface do programa, alguns dados são informados em um acoplamento dos *softwares* Google SketchUp e OpenStudio. Nesses programas são informadas a geometria da edificação, desde superfícies opacas e translúcidas, zonas térmicas e superfícies de sombreamento. Também se informa as condições de contorno e o tipo de construção que constitui cada superfície.

2.3 Modelos Matemáticos Assumidos na Simulação

Uma das soluções mais importantes e que é fundamental para a determinação do comportamento térmico da edificação é a transferência de calor através de superfícies opacas do prédio. O EnergyPlus possibilita a utilização de quatro diferentes modelos para simular esse fenômeno físico [Input Output Reference, 2013]. São elas:

- CTF (*Conduction Transfer Function*) ou função de transferência por condução. Esse modelo assume apenas transferência de calor sensível e não contabiliza infiltração de umidade nas paredes. É solucionado utilizando um método chamado de *state space method* [Engineering Reference, 2013];

- EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) ou profundidade efetiva de penetração de umidade. É um algoritmo que considera difusão de calor sensível e alojamento de umidade dentro de superfícies;

- CondFD (*Conduction Finite Difference*) ou condução por diferenças finitas. É um algoritmo utilizado para pesquisa avançada na transferência de calor em superfícies. Não leva em consideração acúmulo ou difusão de umidade. É calculado por um método de diferenças finitas em uma dimensão;

- *Combined Heat and Moisture Finite Element* ou elemento finito de calor e umidade combinados. Também é um algoritmo utilizado para pesquisa avançada na transferência de calor em superfícies. É calculado por um método de diferenças finitas em uma dimensão mas necessita de propriedades avançadas dos materiais para descrever a difusão de umidade através dos mesmo.

Como o objetivo do trabalho não está em uma análise avançada de penetração de umidade e conforto térmico dentro dos ambientes, o segundo e o quarto método foram descartados. O terceiro método tem o objetivo de resolver a transferência de calor em paredes que contém matérias com trocas de fase e materiais com grandes variação de condutividade. Esse tipo de solução não foi utilizada no presente trabalho e devido à demandar um menor tempo computacional, optou-se por utilizar o primeiro algoritmo para transferência de calor em superfícies. O CTF é um algoritmo tradicional em simulação e já vem sendo utilizado desde o software BLAST [Engineering Reference, 2013].

A outra solução fundamental para o desempenho térmico da edificação é o balanço térmico da zona. O balanço de energia da zona térmica em regime transiente é representado pela equação diferencial ordinária (3.1), considerando a zona como volume único, no qual são aplicadas as parcelas de energia participantes do volume de controle.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2.1)$$

onde: T_z é a temperatura média do ar da zona, [°C], T_{zi} é a temperatura média do ar da zona adjacente, [°C], T_{si} é a temperatura da superfície i da zona, [°C], T_{∞} é a temperatura do ar exterior, [°C], C_z é a capacitância térmica do ar da zona, [J/K], c_p é o calor específico do ar,

[J/kg.K], $h_{c,si}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície i da zona, [W/m².K], A_{si} é a área da superfície i da zona [m²], \dot{m}_i é a vazão mássica de ar proveniente da zona i ou adjacente, [kg/s], \dot{m}_{inf} é a vazão mássica do ar de infiltração na zona, [kg/s], $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada no volume de ar da zona [W], $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$ é a potência térmica das fontes internas de calor transferida por convecção para a zona, [W], $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z)$ é a potência térmica transferida por convecção das superfícies que constituem a zona, [W], $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é a potência térmica devido a troca de ar infiltrado entre zonas, [W], $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a taxa de calor devido à infiltração de ar externo na zona, [W], \dot{Q}_{sys} é a taxa de energia que o sistema de HVAC remove ou entrega na zona, [W].

2.4 Arquivo Climático e Temperatura da Água da Rede

A simulação termo-energética representa o desempenho térmico e energético de uma edificação construída e sendo utilizada em uma certa localidade. A principal influência que essa localidade exerce perante a performance do prédio é o clima. O EnergyPlus realiza os cálculos utilizando dados climáticos definidos pelo usuário através do chamado arquivo climático. Esse arquivo tem a extensão do tipo "epw" (*EnergyPlus Weather*), onde contém dados climáticos das 8760 horas de um ano.

O arquivo climático de Porto Alegre utilizado é um arquivo estatístico do tipo TRY (*Test Reference Year*) e foi desenvolvido pelo método LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) por Carlo, 2005. As temperaturas de bulbo seco das 8760 horas do ano podem ser vistas no gráfico abaixo:

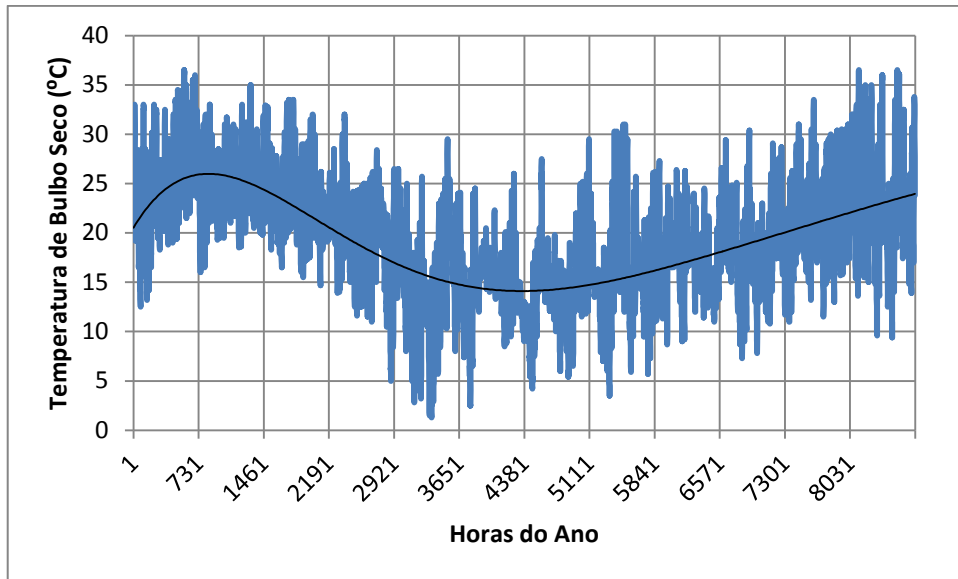


Figura 2.5 - Temperaturas de bulbo seco do arquivo climático de Porto Alegre

É notável a grande amplitude térmica que Porto Alegre apresenta, onde em um período de aproximadamente uma semana houveram temperaturas próximas dos 30°C e próximas do 0°C. Outro fator importante para se entender um clima local é a umidade do ar. No gráfico abaixo podemos ver temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e umidade relativa.

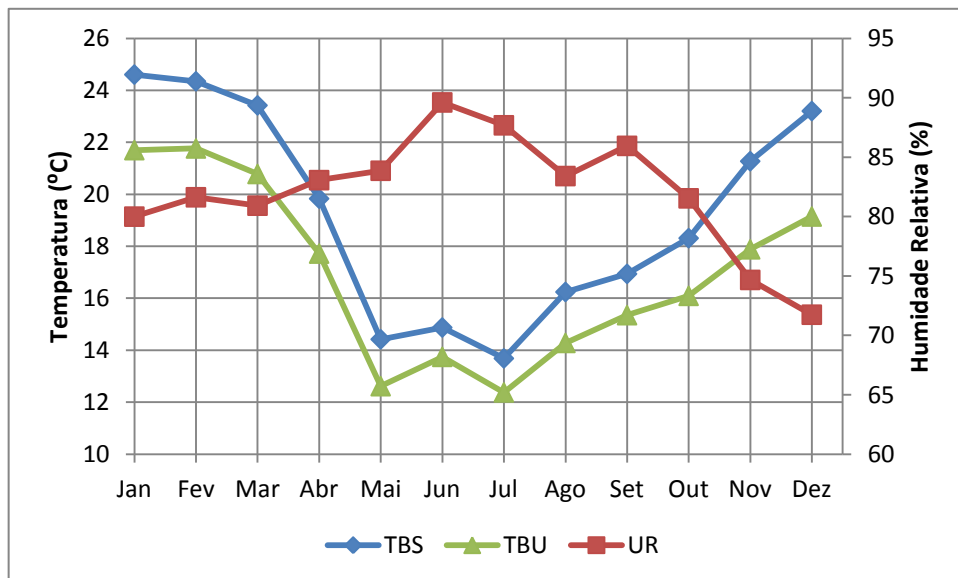


Figura 2.6 - Temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e umidade relativa em médias mensais

Pode-se ver que o nível de umidade média mensal é bem elevado. Nos meses de verão onde há uma maior diferença entre temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido a umidade relativa é um pouco mais baixa e nos meses de inverno essas temperaturas se aproximam e a umidade relativa é maior.

Outros dados importantes de se avaliar em um arquivo climático, além de temperatura e umidade, são a velocidade do vento e a radiação solar incidente no local. Esses dados médios podem ser visto na tabela abaixo:

Tabela 2.1 - Dados climáticos médios do arquivo climático

	TBS (°C)	TBU (°C)	U.R. (%)	Vel. Vento (m/s)	Radiação Global (W.h/m ²)
Média	19,2	16,9	82	3.0	197,9
Máxima	36,5	27,5	100	13	1106
Mínima	1,3	1,3	20	0	0

Além dos dados de clima local, é muito importante definir a temperatura da água que é distribuída pela rede pública quando a simulação envolve qualquer tipo de utilização de água. No caso desse trabalho, o consumo de energia térmica para aquecimento da água é de fundamental importância para se conhecer a aplicabilidade de um sistema com cogeração. Porém, a temperatura da água da rede não está presente em dados de arquivos climáticos e além de ser um dado difícil de se encontrar na literatura, depende da maneira que essa água chega ao prédio e é distribuída na entrada dos sistema que irão consumir energia para aquecê-la. O comprimento, profundidade no solo, presença e exposição de reservatórios de água terão influência na temperatura final que a água será distribuída.

O EnergyPlus, para realizar os cálculos envolvendo aquecimento de água, necessita que o usuário informe a temperatura da água de rede com base horária para todo período que a simulação irá ser realizada. Foi então escolhida uma correlação descrita por Hendron et al., 2004 que utiliza a equação (3.2)

$$T_{mains} = (T_{out,avg} + 6) + r \left(\frac{\Delta T_{out,maxdiff}}{2} \right) \text{sen}(0,986(d - 15 - l) - 90) \quad (2.2)$$

onde: T_{mains} é a temperatura da água, [°C], $T_{out,avg}$ é a média anual da temperatura do ar, [°C], $\Delta T_{out,maxdiff}$ é a máxima diferença entre médias mensais de temperatura do ar, [°C], d é o dia do ano, [1-365].

$$r = 0,4 + 0,01(T_{amb,avg} - 44) \quad (2.3)$$

$$l = 35 - (T_{amb,avg} - 44) \quad (2.4)$$

onde: $T_{amb,avg}$ é a temperatura ambiente média do dia, [°C].

Os dados de temperatura média anual e máxima diferença entre médias mensais de temperatura do ar foram tirados do arquivo climático. A máxima diferença é igual a 10,9°C e a média anual é igual a 19,25°C, as temperatura médias mensais podem ser vistas na tabela abaixo.

Tabela 2.2 - Temperaturas ambientes médias mensais do arquivo climático de Porto Alegre

	Temperatura Média Mensal [°C]	Máxima Temperatura Atingida[°C]	Mínima Temperatura Atingida[°C]
Jan	24,6	36,5	12,5
Fev	24,3	35,0	16,0
Mar	23,4	33,5	14,7
Abr	19,8	32,0	8,0
Mai	14,4	29,5	1,3
Jun	14,9	26,0	2,5
Jul	13,7	27,5	4,2
Ago	16,2	31,0	3,5
Set	16,9	27,3	8,7
Out	18,3	30,4	7,3
Nov	21,3	33,5	11,0
Dez	23,2	36,5	9,4

Entrando com esses dados na simulação e pedindo como saída de dados a temperatura horária da água da rede foi possível ver que essa correlação foi definida para o hemisfério norte. As temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, inverno neste hemisfério. No gráfico a seguir pode-se ver estas temperaturas ao longo do ano.

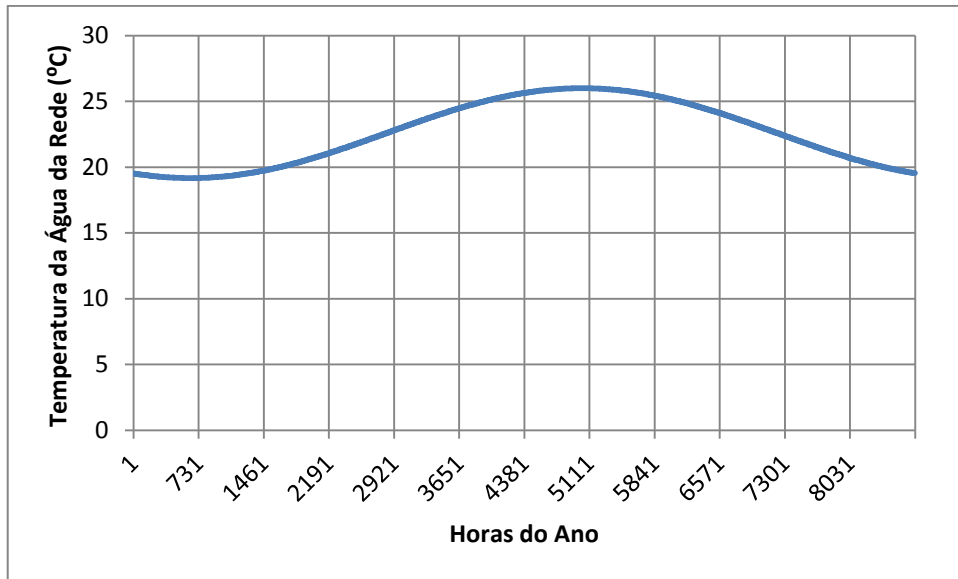


Figura 2.7 - Temperatura da água de rede definida pela correlação de Hendron et al., 2004

Para ajustar estas temperaturas para o hemisfério sul, onde as temperatura mais baixas se darão nos meses de junho, julho e agosto, os dados foram separados exatamente no meio (até a hora 4380 do ano) e trocados de posição com a segunda metade dos dados. O resultado obtido foi a mesma curva apenas com o período deslocado, conforme o gráfico abaixo.

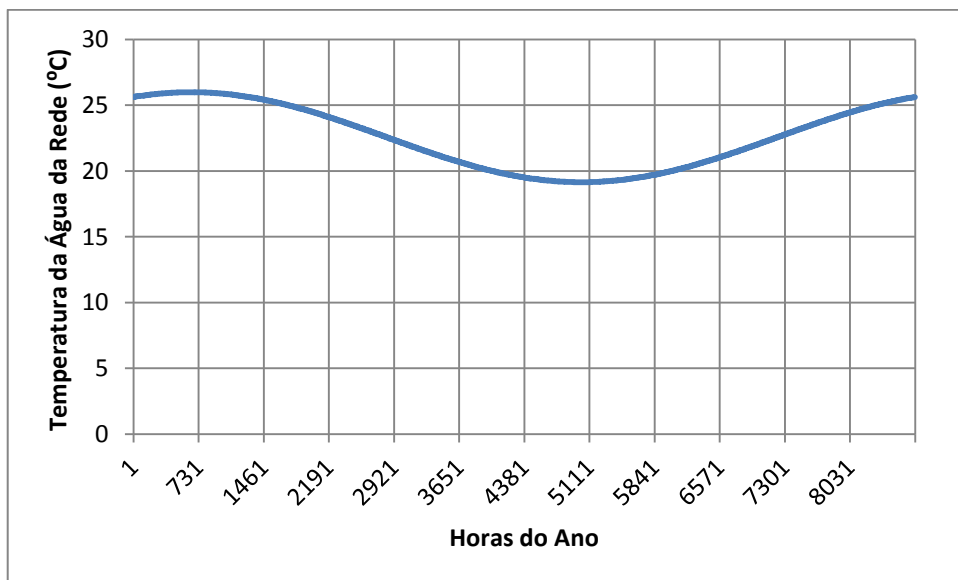


Figura 2.8 - Temperatura da água de rede ajustada para o hemisfério sul

2.5 Modelo de Funcionamento do MotoGerador com Cogeração

A configuração de CHP definida para este estudo foi um ciclo *topping* com um motogerador funcionando para produzir energia elétrica e o aproveitamento da energia rejeitada pelos gases de escapamento, água de refrigeração e óleo de lubrificação, para aquecer água. Esta, então armazenada em um boiler com um aquecedor auxiliar. A água será destinada em seu uso final para água quente de serviço (banho e torneiras). Ambos o motogerador e o aquecedor auxiliar funcionam queimando gás natural.

O modelo utilizado e simulado com o EnergyPlus foi um modelo originalmente desenvolvido para o *software* BLAST e adaptado para o EnergyPlus. As equações, as quais são mostradas abaixo, utilizam ajustes quadráticos em função da carga parcial do motor. Todos os coeficientes a, b, c, d, e foram ajustados de dados de fabricantes dos motores.

$$\frac{EEO}{FEI} = \frac{EEO}{(\dot{m}_{fuel}LHV)} = a_1 + a_2PLR + a_3PLR^2 \quad (2.5)$$

$$PLR = \frac{EEO}{NGC} \quad (2.6)$$

onde: *EEO* (*Electric Energy Output*) é a potencia elétrica, [W], *FEI* (*Fuel Energy Input*) é a taxa de energia liberada pela queima do combustível, [W], *NGC* (*Nominal Generator Capacity*) é a capacidade nominal do gerador, [W], \dot{m}_{fuel} é a vazão mássica de combustível queimado pelo motor, [kg/s], *PLR* (*Part Load Ratio*) é a carga parcial que o motor está funcionando e *LHV* (*Lower Heating Value*) é o poder calorífico inferior, [J/kg].

Para definir a quantidade de calor rejeitada pelo motor e aproveitada na cogeração são utilizadas as seguintes equações:

$$\frac{TEH}{FEI} = \frac{TEH}{(\dot{m}_{fuel}LHV)} = d_1 + d_2PLR + d_3PLR^2 \quad (2.7)$$

$$\frac{EGT}{FEI} = \frac{EGT}{(\dot{m}_{fuel}LHV)} = e_1 + e_2PLR + e_3PLR^2 \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_{exhaust} = \frac{TEH}{Cp_{exhaust}(T_{exhaust} - T_{reference})} \quad (2.9)$$

onde: TEH (*Total Exhaust Heat*) é a taxa de energia aproveitada dos gases de escapamento do motor, [W], EGT (*Exhaust Gas Temperature*) é a temperatura dos gases de escapamento do motor, [K], $\dot{m}_{exhaust}$ é a vazão mássica de gases do escapamento, [kg/s], $Cp_{exhaust}$ é o calor específico dos gases de escapamento, [J/kg.K], $T_{exhaust}$ é a temperatura em que os gases de escapamento saem do motor, [K] e $T_{reference}$ é a temperatura de referência para o poder calorífico inferior, [K]. A temperatura de referência é normalmente especificada pelos fabricantes em 25 °C.

$$\frac{RJH}{FEI} = \frac{RJH}{(\dot{m}_{fuel}LHV)} = b_1 + b_2PLR + b_3PLR^2 \quad (2.10)$$

$$\frac{RLOH}{FEI} = \frac{RLOH}{(\dot{m}_{fuel}LHV)} = c_1 + c_2PLR + c_3PLR^2 \quad (2.11)$$

onde: RJH (*Recoverable Jacket Heat*) é a taxa de energia aproveitada do fluido que refrigera as camisas dos pistões, [W], e $RLOH$ (*Recoverable Lube Oil Heat*) é a taxa de energia aproveitada do óleo de lubrificação do motor, [W].

Os fabricantes dos motores informam as taxas de energia liberada nos gases de combustão, fluido de arrefecimento e óleo de lubrificação para um série de diferentes condições de funcionamento do motor. A partir desses dados, se acham todos os coeficientes especificados nas equações acima. Para este presente trabalho, o cálculo dos coeficientes aparece detalhadamente no item 3.4.

2.6 Modelo de Viabilidade Econômica

Para saber se a aplicação de um sistema com CHP é realmente uma boa opção, além de viabilidade técnica, é crucial realizar uma análise financeira para se conhecer a viabilidade econômica da instalação. Essa análise deve levar em conta vários aspectos da implantação como: investimento inicial, custo anual de manutenção e redução de custo de operação do prédio.

Existem algumas maneiras de se avaliar economicamente e financeiramente uma alternativa de investimento. Algumas opções quantitativas são a Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e o tempo de retorno (*payback*), [Soares, 2013]. Para esse trabalho foram utilizados primeiramente dois desses métodos, o VPL e o *payback*. Contudo, os resultados finais do trabalho foram baseados apenas no *payback*.

O VPL consiste em trazer a valor presente, descontado à Taxa Mínima de Atratividade, o fluxo de caixa incremental a ser gerado pela alternativa analisada. Pode ser calculado pela seguinte equação:

$$VPL = \sum_{i=0}^n F_i(1 + TD)^i \quad (2.12)$$

onde: F_i é o fluxo de caixa no período i , [R\$] e TD é a taxa de desconto que será considerada.

Para a alternativa ser considerada viável, o VPL deve ser positivo. No caso de comparação entre alternativas a melhor será a que tiver o VPL maior.

O tempo de retorno do investimento ou *payback* é o tempo necessário para que a redução de custo operacional compense o investimento realizado na instalação do sistema. Existe o *payback* simples, onde simplesmente se somam as parcelas de cada período até ser igual ao investimento realizado, e o *payback* descontado. No *payback* descontado as parcelas de cada período são trazidas ao valor presente (VP) com a taxa de desconto escolhida para analisar o investimento. Para se calcular o VP utiliza-se a seguinte equação:

$$VP = \frac{F_i}{(1 + TD)^i} \quad (2.13)$$

Para o investimento ser considerado viável o tempo de retorno deve ser menor que a vida útil do equipamento e, no caso da comparação entre dois investimentos, o melhor será o que tiver menor tempo de retorno.

2.7 Ajuste de Curvas

Na parte final do trabalho foi realizado um ajuste de curva para descrever o comportamento dos resultados estudados. Para realizar o ajuste foi utilizado um *software* específico para esse tipo de análise, chamado CurveExpert Professional. Este *software* é uma plataforma para ajuste de curvas e análise de dados, onde os mesmos são ajustados com ferramentas que utilizam regressões lineares, não lineares, métodos de suavização e vários tipos de *splines* [Hyams, 2014].

Para o ajuste realizado neste trabalho foi utilizado uma regressão não linear. Essa regressão utiliza o método dos mínimos quadrados para realizar o ajuste. Trata-se de uma técnica que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar o somatório dos quadrados das diferenças entre valor estimado da função e os dados observados.

A técnica é utilizada para determinar um conjunto de parâmetros c_j de uma função f^* que aproxima uma função desconhecida f , onde f^* é dada por:

$$f^*(x) = c_1\phi_1(x) + c_2\phi_2(x) + \dots + c_n\phi_n(x) \quad (2.14)$$

onde c_j são os coeficientes e $\phi_j(x)$ são as funções conhecidas e linearmente independentes. A escolha das funções $\phi_j(x)$ é feita de acordo com a natureza dos dados a serem ajustados. No caso do CurveExpert são sugeridos mais de 60 modelos e é realizada uma classificação dos que obtiveram melhor ajuste.

Para determinar os coeficientes c_j é feita a seguinte consideração através de uma nova função R_i :

$$R_i = f^*(x_i) - y_i, i = 1, \dots, m \quad (2.15)$$

onde x_i e y_i são os dados observados. Os coeficientes serão determinados para que a função f^* tenha o melhor ajuste, no sentido dos mínimos quadrados, aos dados observados, onde a soma dos quadrados dos resíduos seja mínima.

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^m R_i^2 = \sum_{i=1}^m (f^*(x_i) - y_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^m (c_1 \phi_1(x) + c_2 \phi_2(x) + \dots + c_n \phi_n(x))^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

onde R é o resíduo da diferença entre a função f^* e os dados observados.

Sabemos que para obter o ponto mínimo da função devemos determinar seus pontos críticos. Essa determinação pode ser feita através da derivada da função. Assim os coeficientes c_j são determinados fazendo a derivada e igualando a zero a função resíduo R [Roque, 2013]:

$$\frac{\partial R}{\partial c_j} = 0 \quad (2.17)$$

3 DEFINIÇÃO DO HOTEL

Neste capítulo mostra-se o processo de elaboração do hotel em que foi estudada a aplicação do sistema de cogeração. Como o trabalho tem o objetivo de mostrar resultados generalizados do setor hoteleiro em Porto Alegre, o hotel escolhido tenta representar o que seria um padrão de mercado. Para se chegar a esse padrão, no que diz respeito as demandas energéticas, foi realizado um levantamento de informações, descrito no subcapítulo seguinte.

A definição dos parâmetros que influenciam o consumo de energia desse hotel, também chamado de modelo de referência, foi estabelecida com base nos dados do levantamento. A partir do modelo de referencia, mantendo-se os mesmos parâmetros foi criado um outro modelo que utiliza um sistema com CHP. A partir desses dois modelos pode-se fazer uma comparação energética e uma análise de viabilidade econômica da implantação do sistema.

3.1 Pesquisa de Consumo Energético em Hotéis de Porto Alegre

Afim de entender o desempenho energético que os hotéis construídos em Porto Alegre apresentam, foi realizada uma pesquisa coletando dados de consumo energético em diversos empreendimentos do setor hoteleiro. A ideia da pesquisa foi investigar as características dos equipamentos presentes nos hotéis que apresentam consumo de energia e analisar suas contas de energia elétrica e de combustível. A pesquisa de todos esses dados teve o objetivo de ajudar a formatar o modelo que foi simulado para realizar as análises energéticas e econômicas da aplicação de um sistema de CHP nos hotéis.

Pryadarsini, et al., 2009, mostrou que uma pesquisa realizada no setor hoteleiro de Singapura levantou dados referentes ao consumo de energia elétrica e consumo de combustível e, para entender o desempenho energético dos estabelecimentos, levantou também características como: área construída, ano de construção, ano de reforma, número de funcionários, presença de lavanderia e presença de piscina aquecida. Tais características são relevantes pois influenciam na intensidade de uso de energia. Essa intensidade de uso de energia é um dado utilizado para comparação entre edificações, a fim de se estabelecer o nível de consumo de energia das mesmas. Este dado, deve ser normalizado em relação a alguma característica que tenha grande peso no consumo da edificação. Algumas opções são: área

construída, número de apartamentos, número de diárias alugadas por ano e número de funcionários. O artigo [Pryadarsini, et al., 2009] mostrou que área construída foi a característica mais representativa em relação ao consumo energético dos hotéis e, como trata-se de uma prática consolidada em análises de desempenho energético de edificações que utilizam esse dado (kWh/m²) para comparações, resolveu-se seguir esta convenção no presente trabalho.

A seleção dos hotéis que foram incluídos na pesquisa foi baseada nos critérios de número de apartamentos e tradição na indústria hoteleira. Foram escolhidos hotéis já consolidados no mercado e que são referência em Porto Alegre. Em relação ao tamanho dos empreendimentos, como o intuito da pesquisa é mostrar as viabilidades econômicas da utilização do sistema de CHP, foram escolhidos hotéis de médio a grande porte. Assim esses, devem apresentar elevadas demandas energéticas, facilitando que haja viabilidade econômica na instalação do sistema com cogeração. Foram selecionados nove hotéis considerados de médio (entre 50 e 150 apartamentos) e grande (mais de 150 apartamentos) porte [Bohdanowicz, et al., 2001].

Tabela 3.1 - Dados hotéis selecionados para pesquisa

Hotel	Núm. de aptos.	Área média dos aptos. (m²)
Hotel 01	172	-
Hotel 02	169	37
Hotel 03	132	35
Hotel 04	177	48
Hotel 05	152	41
Hotel 06	284	34
Hotel 07	120	35
Hotel 08	125	-
Hotel 09	126	-
Média	162	38

Por questões comerciais, as gerências dos hotéis não permitiram que seus nomes fossem divulgados. Portanto, os mesmos foram nomeados genericamente. Devido a razões de disponibilidade dos nove hotéis selecionados para pesquisa, apenas foi possível levantar dados de cinco empreendimentos. As informações desses cinco hotéis compuseram a pesquisa realizada neste presente trabalho. As características observadas foram as seguintes:

- Área construída
- Número de apartamentos
- Possui piscina aquecida / Possui lavanderia
- Sistema de climatização
- Sistema de aquecimento de água
- Tarifação de energia elétrica / Combustíveis utilizados
- Consumo de energia elétrica no período de um ano
- Consumo de combustível no período de um ano
- Ocupação média mensal / Ocupação média diária (qualitativamente)

Dentre os hotéis listados na tabela anterior, os que participaram da pesquisa foram os hotéis 02, 03, 04, 06 e 08. A partir dos dados das contas de energia foi realizado, primeiramente uma normalização dos consumos mensais e anuais em relação a área construída (kWh/m²) dos mesmos. Após, achou-se a média dos consumos dos cinco hotéis, separadamente para energia elétrica e consumo de combustível.

Tabela 3.2 - Consumos mensais e anuais normalizados de energia elétrica

	Hotel 02	Hotel 03	Hotel 04	Hotel 06	Hotel 08
Mês	Consumo (kWh/m²)	Consumo (kWh/m²)	Consumo (kWh/m²)	Consumo (kWh/m²)	Consumo (kWh/m²)
Jan	6,65	4,69	2,63	9,12	4,48
Fev	7,26	5,91	2,19	7,14	4,30
Mar	7,51	6,11	2,58	7,25	3,87
Abr	6,39	5,15	2,12	6,53	3,08
Mai	5,19	4,58	2,46	6,62	3,00
Jun	5,22	4,34	2,25	5,20	2,86
Jul	4,39	4,40	2,11	6,11	2,99
Ago	4,88	5,31	2,31	6,19	-
Set	5,43	4,72	2,41	6,09	-
Out	5,09	4,28	2,35	4,93	-
Nov	6,35	5,06	2,34	7,79	-
Dez	5,89	5,91	2,80	8,31	-
Total	70,25	60,46	28,54	81,27	-

Os dados apresentados pelos hotéis são referentes aos consumos do ano de 2012. O Hotel 08 não disponibilizou os dados dos meses de agosto em diante e também não disponibilizou dados de consumo de combustível.

Tabela 3.3 - Consumos mensais e anuais normalizados de combustível

	Hotel 02	Hotel 03	Hotel 04	Hotel 06
Mês	Consumo (kWh/m ²)	Consumo (kWh/m ²)	Consumo (kWh/m ²)	Consumo (kWh/m ²)
Jan	4,62	2,25	2,03	1,96
Fev	4,62	1,59	1,81	1,28
Mar	5,24	1,91	2,07	1,83
Abr	4,39	1,95	2,98	2,84
Mai	5,45	2,51	2,98	2,89
Jun	5,50	3,63	3,33	3,56
Jul	5,75	3,12	4,27	3,74
Ago	5,92	4,54	3,32	3,48
Set	5,79	2,93	3,60	2,82
Out	5,28	2,79	3,23	3,29
Nov	5,21	2,88	2,25	2,13
Dez	3,34	2,01	1,97	1,95
Total	61,10	32,12	33,83	31,78

Nos gráficos abaixo pode-se ver os perfis anuais desses consumo de energia elétrica e combustível.

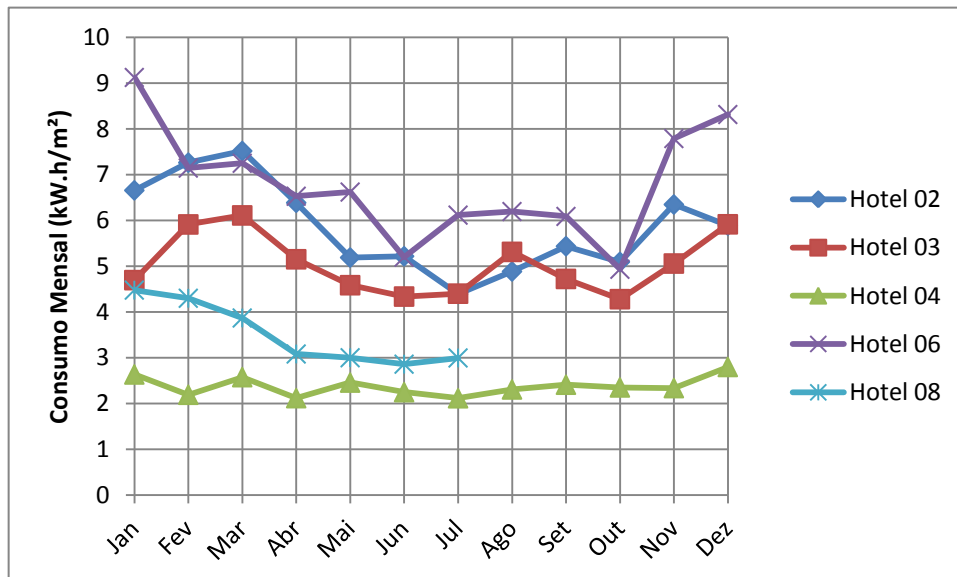


Figura 3.1 - Perfis anuais de consumo de energia elétrica

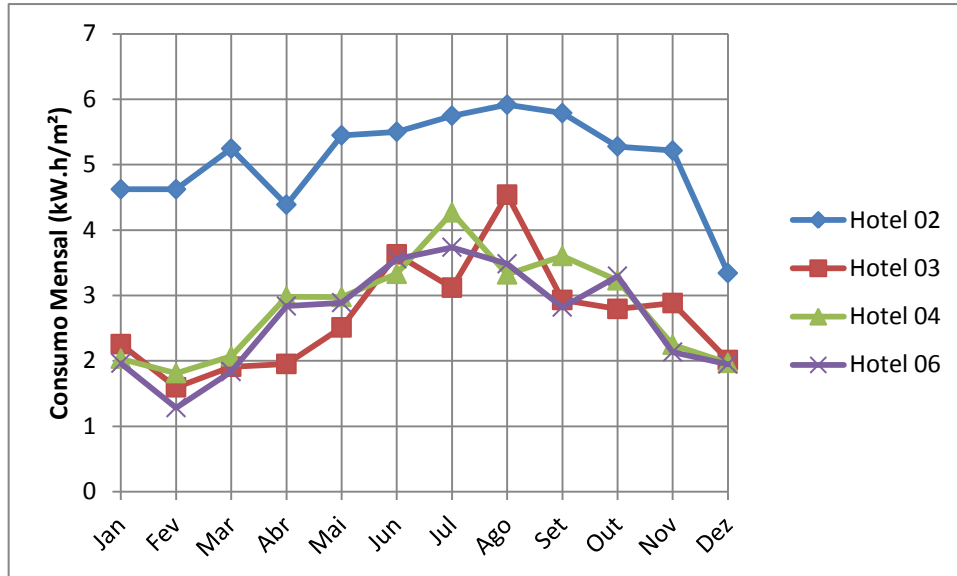


Figura 3.2 - Perfis anuais de consumo de combustível

É possível observar que existe uma diferença nos valores absolutos dos consumos de energia elétrica, porém os perfis seguem uma mesma tendência, mostrando maior consumo nos meses de verão e menor nos meses de inverno. Esse fato se deve ao peso do consumo do sistema de ar condicionado. Já no perfil do consumo de combustível, todos os hotéis, exceto o hotel 02, tiveram um resultado muito semelhante, aonde nos meses de inverno apresentaram maior consumo pelo fato da água disponibilizada pela rede estar mais fria durante esses meses. A razão do hotel 02 ter resultado bastante diferente se deve a utilização do combustível para operar um motogerador funcionando para atender a demanda de energia elétrica em horário de ponta. Em todos outros hotéis o combustível é apenas utilizado para aquecimento de água de serviço (chuveiros, torneiras e piscinas). Esse fato fez com que os valores do consumo de combustível do hotel 02 não fossem levados em consideração no cálculo da média deste consumo.

Realizando a média dos consumos de energia elétrica dos cinco hotéis e de consumo de combustível dos cinco hotéis exceto o hotel 02 achou-se um resultado de 57,94 kWh/m² por ano de energia elétrica e 32,58 kWh/m² por ano de consumo de combustível. Os combustíveis utilizados nos hotéis pesquisados foram óleo Diesel, gás natural e GLP, sendo que cada hotel utilizava apenas um desses três. Nos gráficos 4.3 e 4.4 abaixo podem ser vistas as médias mensais dos consumos levantados na pesquisa. Estes foram comparados com a temperatura de bulbo seco do ar (energia elétrica) e com a temperatura da água da rede (combustível) para mostrar que esses parâmetros têm grande influência no comportamento

desses consumos conforme salientado no parágrafo anterior. Os dados da temperatura do ar foram tirados do arquivo climático e a temperatura da água da rede, da correlação apresentada por Hendron et al., 2004 e ajustada para o hemisfério sul. Ambos os dados, foram utilizados para realizar as simulações termo-energéticas deste presente trabalho.

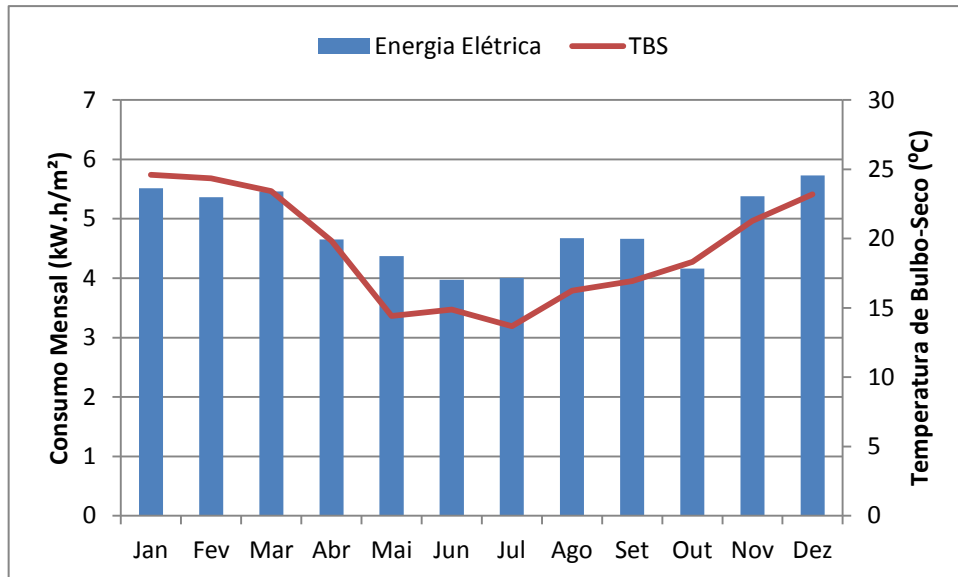


Figura 3.3 - Médias mensais de consumo de energia elétrica

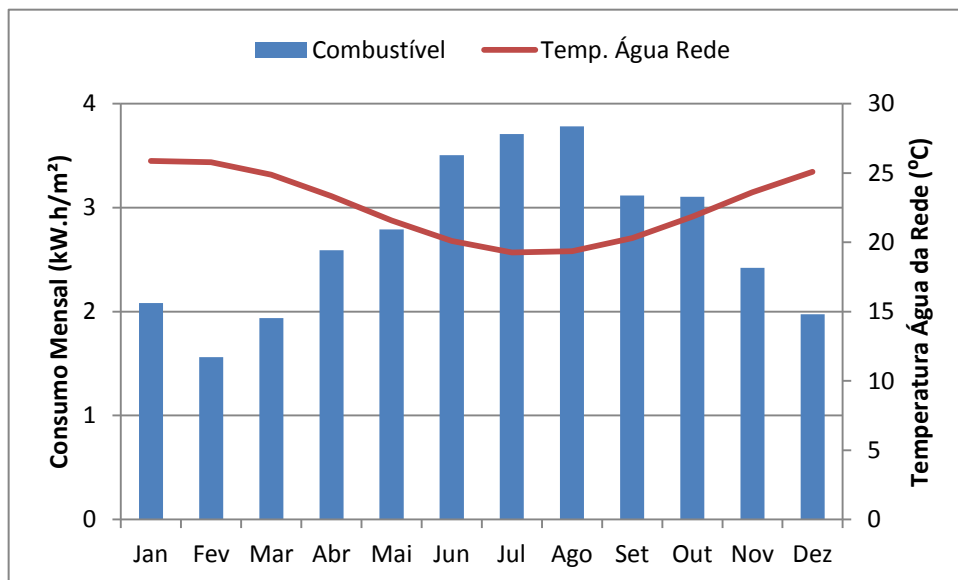


Figura 3.4 - Médias mensais de consumo de combustível

Outro dado importante para entender o comportamento energético dos hotéis, que foi levantado quantitativamente na pesquisa, foi a ocupação média mensal dos estabelecimentos.

Além dos parâmetros citados no parágrafo acima (temperatura do ar e da água da rede), esse dado pode influenciar o perfil de consumo de energia anual que o prédio desempenha. A ocupação mensal levantada na pesquisa foi comparada com BEMTUR, 2012 para saber se os hotéis selecionados seguem o perfil de ocupação característico que os hotéis de Porto Alegre tiveram no ano de 2012.

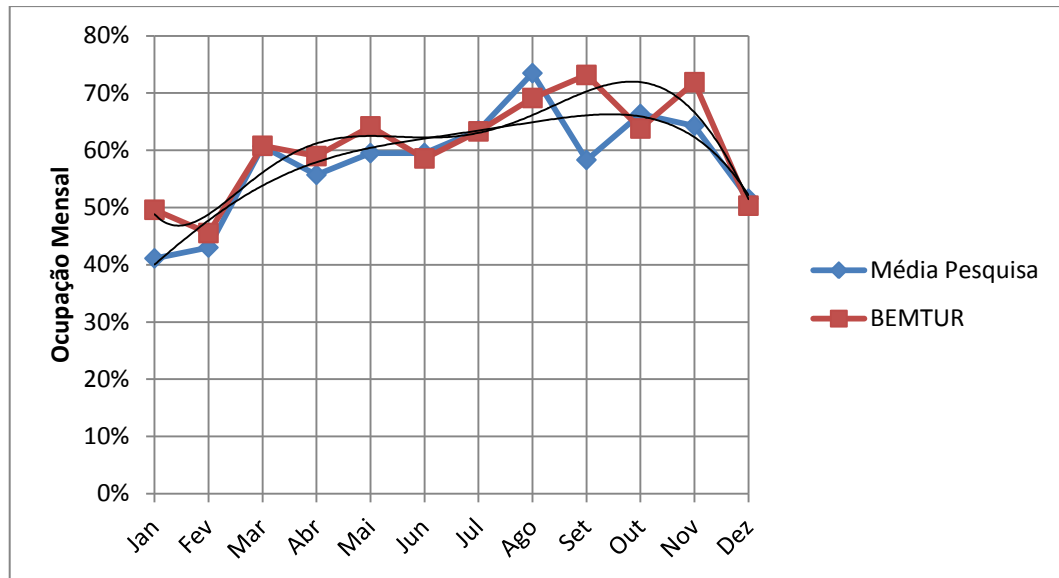


Figura 3.5 - Médias mensais de ocupação

O gráfico acima demonstra que a ocupação dos hotéis selecionados na pesquisa, com média anual de 58 %, foi muito próxima da ocupação mostradas por BEMTUR, 2012, com média anual de 61 %.

A pesquisa realizada no presente trabalho mostrou que existem diferenças nos consumos anuais (kWh/m²) entre os hotéis. Para energia elétrica houveram diferenças mais expressivas, já para consumo de combustível as diferenças foram muito pequenas. Essas diferenças de consumo de energia elétrica podem ser explicadas pelos diferentes tipos e eficiências dos sistemas que os hotéis utilizam. Estes apresentam diferentes sistemas de climatização, podem ter sistemas de iluminação com diferentes eficiências e ainda equipamentos como motores, elevadores e computadores com diferentes densidade de potência (W/m²). Como as contas de energia levantadas apresentam apenas um valor total de consumo, e não é possível separar o consumo por uso final, é difícil identificar qual a origem dessas diferenças de consumo de energia elétrica entre os diferentes estabelecimentos. Foi observado em visitas aos hotéis que alguns utilizam, como sistema de climatização, água

gelada produzida por *chillers* e distribuída nos ambientes por *fan coils*, já outros utilizam aparelhos do tipo *split* e de janela. O sistema de iluminação não foi analisado com maior detalhamento. Quanto ao sistema de aquecimento de água, foi visto que todos os hotéis utilizam um boiler central com tanque de termoacumulação, alguns queimando GLP e outros gás natural.

Com os dados levantados nessa pesquisa foi possível realizar as análises energéticas utilizando a simulação computacional com maior qualidade e maior representação da realidade. A comparação entre os resultados da simulação do modelo de referência (descrito no item 3.2) com os dados da pesquisa possibilitou com que houvesse essa maior proximidade dos resultados com a realidade descrita pelo levantamento de dados. O ajuste do modelo de referência com os consumos médios levantados pela pesquisa está descrito com item 3.3. A partir dos resultados da simulação é possível compreender melhor como se dão os consumos separados por uso final, citados no parágrafo anterior.

3.2 Modelo de Referência

O modelo de referência representa o hotel que foi considerado, neste trabalho, padrão de mercado na cidade de Porto Alegre. Os dados de número de apartamentos, área dos mesmo e padrão de uso foram retirados dos levantamentos realizados nos hotéis que participaram da pesquisa. Os dados de área dos apartamentos e quantidade de quartos por hotel foram apresentados na tabela 4.1, e para definir os dados do modelo, realizou-se uma média dos mesmos. O número de quartos por hotel médio foi de 162 e a área média dos apartamentos foi de 38,3 m². Por questões geométricas, para criar o modelo com o *software* Google SketchUp esses valores foram aproximados e são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 3.4 - Dados do hotel modelo de referência

Total Aptos	132
Aptos p/Pavimento	12
Número de Pavimentos	14
Área Aptos. (m ²)	38,26
Área Total de Aptos. (m ²)	5050,32
Área de Uso Comum (m ²)	1460,44
Área de Salão Eventos (m ²)	269,08
Área Administrativa (m ²)	114,78
Área de Restaurantes (m ²)	417,60
Área de Serviço (m ²)	1026,10
Área Total	8338,32

Para determinar o perfil de uso do hotel são utilizados, como dados de entrada na simulação, *schedules* que determinam quando os quartos estão ocupados. A determinação desses *schedules* de ocupação do modelo de referência foi baseado nos dados apresentados por BEMTUR, 2012, onde está descrita a ocupação média mensal de hotéis em Porto Alegre nos anos de 2010 a 2012.

Tabela 3.5 - Ocupação média mensal de hotéis em Porto Alegre [adaptado de BEMTUR, 2012]

	2010	2011	2012	Média
Jan	45%	50%	53%	50%
Fev	42%	51%	44%	46%
Mar	63%	57%	63%	61%
Abr	59%	61%	56%	59%
Mai	66%	64%	62%	64%
Jun	58%	59%	59%	59%
Jul	67%	61%	63%	63%
Ago	71%	68%	68%	69%
Set	71%	75%	73%	73%
Out	62%	66%	64%	64%
Nov	72%	72%	72%	72%
Dez	51%	50%	50%	50%

Como o hotel modelo de referência possui 132 quartos, a ocupação mensal foi definida pela média mostrada na tabela anterior multiplicada pelo número de apartamentos do hotel, por exemplo: no mês de janeiro houve uma ocupação média de 50%, então os *schedules* determinam que 66 dos 132 quartos estivessem ocupados. Quanto à ocupação diária a

pesquisa realizada neste trabalho mostrou, qualitativamente, que o perfil de uso é predominantemente executivo, onde há alta ocupação depois do horário comercial e a noite, e no período da manhã os hóspedes saem a trabalho retornando apenas no final da tarde.

No caso das carga internas, utilizou-se valores estabelecidos em normas de desempenho energético de edificações, pois esses dados não foram levantados na pesquisa devido à dificuldade de serem conhecidos pelas gerências dos hotéis. Os valores das cargas internas utilizados no modelo de referência são mostrados abaixo [ASHRAE, 2007]:

Tabela 3.6 - Cargas internas

	Ocupação	Iluminação (W/m ²)	Equipamentos Elétricos (W/m ²)
Quartos	2 pessoas	12	2,7
Restaurante	9 m ² /pessoa	14	-
Escritório	7 m ² /pessoa	12	10,8
Uso Comum	23 m ² /pessoa	12	-
Banheiros	-	10	-
Corredores	-	5	-
Serviço	-	6	-
Convenção	7 m ² /pessoa	14	-

A infiltração de ar é um fator que tem bastante influência no consumo do sistema de ar condicionado, os valores utilizados para a simulação do modelo de referência foram estabelecidos a partir de um guia para prédios considerados sustentáveis e de baixo consumo energético. Este guia estabelece valores empíricos de infiltração de ar para uma série de prédios. Os valores de infiltração são estabelecidos em renovações por hora (ren/h), que significa o número de vezes que todo volume de ar da zona é trocado em uma hora. Abaixo pode-se ver os valores utilizados no modelo de referência [CIBSE, 2006].

Quartos - 0,65 ren/h;

Restaurante - 0,65 ren/h;

Escritório - 0,65 ren/h;

Convenção - 0,65 ren/h;

Hall de Entrada - 1 ren/h.

Um dado que tem grande influência no resultado deste trabalho e é de alta importância para o desempenho energético de um prédio é o sistema de aquecimento de água. O sistema escolhido para ser utilizado no modelo de referência foi baseado no que foi visto na pesquisa realizada. O sistema mais utilizado nos hotéis pesquisados em Porto Alegre é um sistema de aquecimento central com um boiler a gás natural junto com um tanque para acumulação de água quente. Porém, a capacidade desse sistema varia de hotel para hotel conforme a demanda de água quente que estes apresentam.

O dimensionamento utilizado para se achar a capacidade do boiler e o volume do tanque de acumulação no modelo de referência foi um método apresentado por EnergyPlus Input Output Reference, 2013, chamado de demanda de pico (*peak draw*). Neste método o volume do tanque é dimensionado pelo tempo em que este consegue atender a demanda máxima de água quente, e a capacidade do boiler é dimensionada pelo tempo que este leva para preencher o volume do tanque com água na temperatura escolhida pelo termostato. Foram utilizados como tempo para dimensionamento do tanque 0,25 horas e para dimensionamento do boiler 1 hora. Com esses valores o volume do tanque foi dimensionado em 12,96 m³ e a capacidade do boiler de 640 kW. Para definir a demanda de água quente se estabeleceu uma vazão dos chuveiros de 9,6 L/min [ASHRAE, 2007] com dois banhos diários por apartamento de 15 minutos, a uma temperatura de 40 °C. A temperatura de acumulação do tanque foi definida em 60 °C. Com esses dados e o *schedule* de uso dos chuveiros se chega a uma demanda de energia térmica do hotel.

A variação de temperatura da água armazenada é dada pela seguinte equação:

$$\dot{m}C_p \frac{dT}{dt} = q_{net} \quad (4.1)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica de água do tanque, [kg/s], C_p é o calor específico da água, [J/kg.K], $\frac{dT}{dt}$ é a variação de temperatura com o tempo da água no tanque, [K] e q_{net} é a transferência de calor no tanque, [W].

Sabendo a vazão de água do tanque e a temperatura que deve ser atingida, controlada pelo termostato, o consumo energético do boiler é achado com a equação 4.1 e pela equação de balanço energético 4.2:

$$q_{net} = q_{heater} + q_{oncycle} + q_{offcycle} + q_{use} + q_{source} \quad (4.2)$$

onde q_{heater} é a troca de calor dada pela queima do combustível (consumo energético do boiler), [W], $q_{oncycle}$ é a troca de calor do tanque com o ambiente durante operação (é nula quando o boiler não está funcionando), [W], $q_{offcycle}$ é a troca de calor do tanque com o ambiente fora de operação (é nula quando o boiler está funcionando), [W], q_{use} é a troca de calor dada pelo uso de água quente dos chuveiros, [W], q_{source} é a troca de calor por algum outro tipo de equipamento que forneça energia ao tanque (no modelo de referência é nula, porém quando utilizado o CHP é a energia disponibilizada pela recuperação de calor no motogerador), [W].

Outro equipamento que tem papel determinante no desempenho energético do prédio é o sistema de ar condicionado. Foi visto que o sistema mais utilizado nos hotéis em Porto Alegre é o *split* individual. No modelo de referência foi utilizado um modelo contido no EnergyPlus chamado de PTHP (*Package Terminal Heat Pump*) que pode representar um *split* individual ou um aparelho de janela. Foram distribuídos esses equipamentos individuais por zona térmica do hotel. O dimensionamento do sistema é dado por um modo chamado de *autosize*, no qual o software calcula a capacidade de refrigeração, aquecimento e vazão de insuflamento baseado na equação de balanço térmico da zona 3.1 e no dia de projeto.

Tabela 3.7 - Dias de projetos utilizados [ASHRAE, 2009]

Dia de Projeto	Tipo de Dia de Projeto	Máxima TBS (°C)	ΔTBS Diário (°C)	Velocidade do Vento (m/s)	Método para Radiação Solar
99,6% - TBS	Dia de Projeto de Inverno	4,1	0	1	ASHRAEClearSky
99,6% - Ponto de Orvalho	Dia de Projeto de Inverno	8,7	0	1	ASHRAEClearSky
99,6% - Velocidade do Vento	Dia de Projeto de Inverno	11,3	0	10,1	ASHRAEClearSky
0,4% - TBS	Dia de Projeto de Verão	34,9	9,8	3,4	ASHRAETau
0,4% - TBU	Dia de Projeto de Verão	31,6	9,8	3,4	ASHRAETau
0,4% - Ponto de Orvalho	Dia de Projeto de Verão	28,3	9,8	3,4	ASHRAETau

O dimensionamento do sistema de ar condicionado se dá com o dia de projeto que apresentar a carga térmica de pico mais severa.

Para definir os coeficientes de performance (COP) dos equipamentos foram utilizados os valores indicados por ASHRAE, 2010. Esse dado é de fundamental importância pois está diretamente relacionado com o consumo de energia que o sistema de ar condicionado irá apresentar.

Como o prédio do modelo de referência é para ser representativo de um padrão de mercado, a geometria do prédio foi definida para ser muito simples e ter pouca influência da orientação solar. Foi escolhida uma geométrica retangular que se aproxima da simetria perfeita. Na figura abaixo, pode-se ver a geometria do hotel modelado no Google SketchUp:

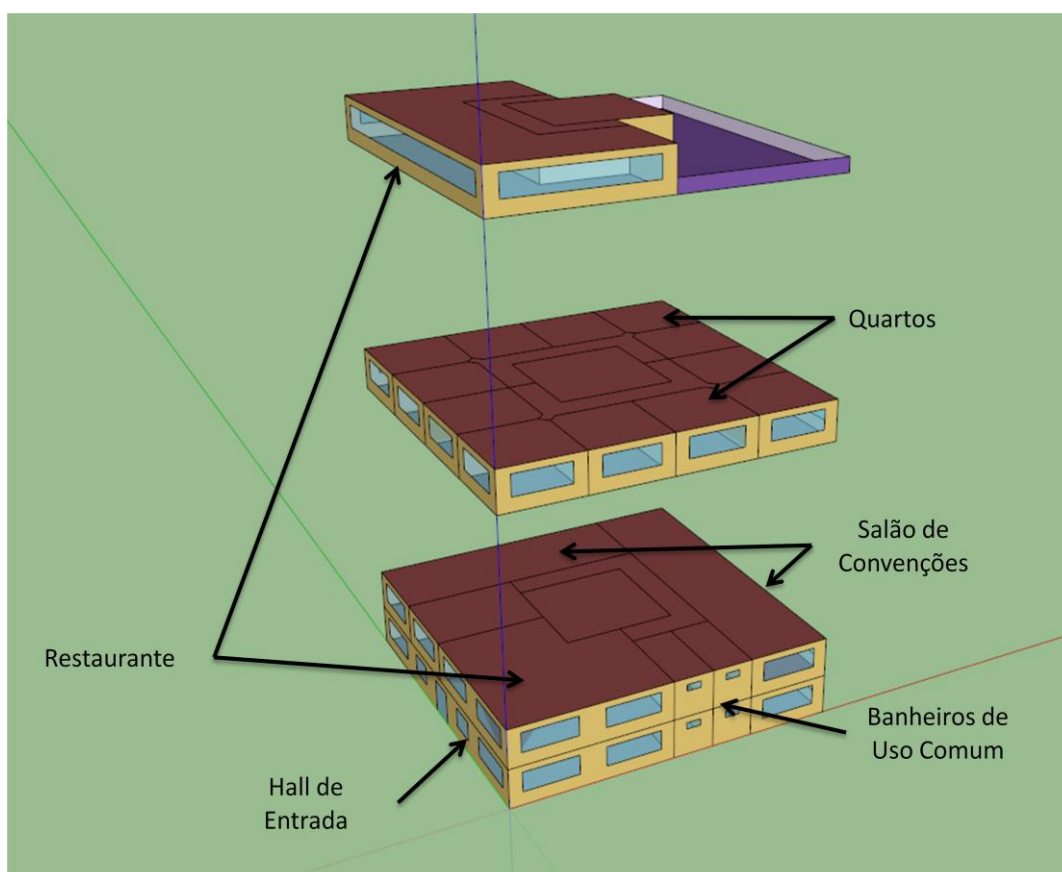


Figura 3.6 - Geometria do hotel

É possível notar que existe um espaço vazio entre os pavimentos, isso ocorre porque o pavimento intermediário é um pavimento tipo e se repete onze vezes. No caso da modelagem na simulação pode-se modelar apenas uma vez o pavimento tipo e utilizar um fator

multiplicador de quantas vezes esse pavimento se repete. O software irá multiplicar todos os consumos do pavimento com esse fator.

Na figura abaixo é mostrada uma representação do modelo com todos os pavimentos repetidos apenas para visualização do prédio de uma maneira mais realista, como seria caso fosse construído.

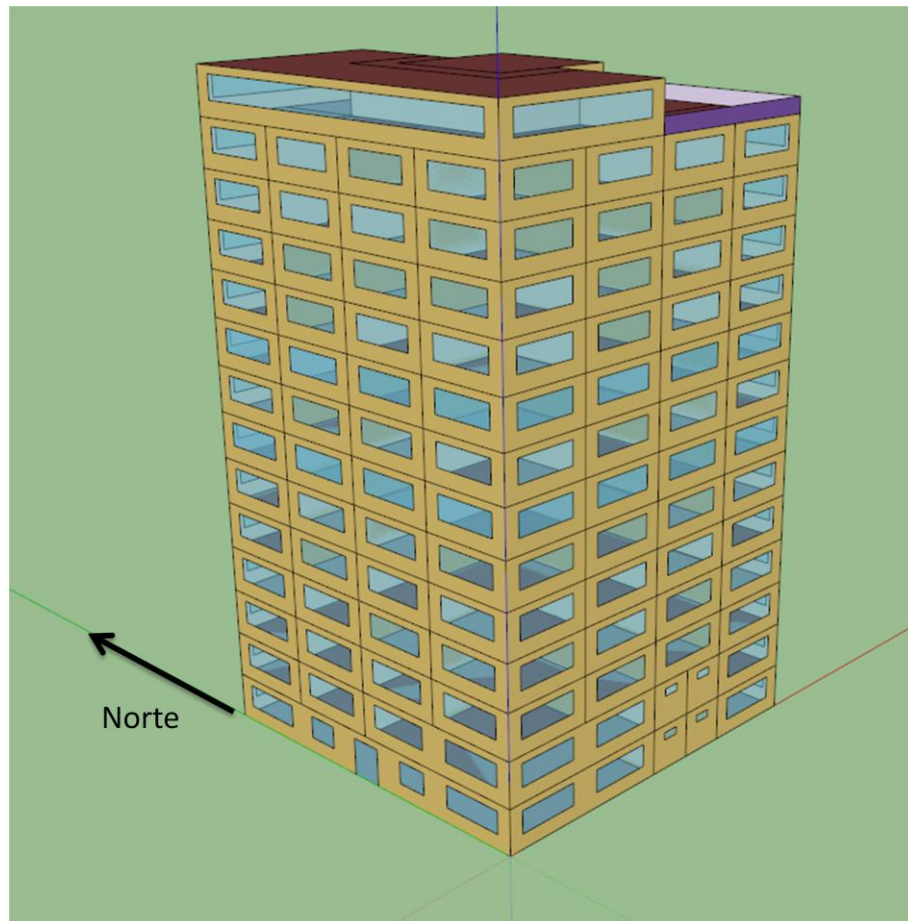


Figura 3.7 - Modelo representativo

A simulação do modelo de referência é realizada para as 8760 horas do ano. Porém, todos os cálculos são realizados em um intervalo de tempo que é chamado de *timestep*. O esse intervalo de tempo divide a hora em frações nas quais serão realizados todos os cálculos envolvidos na simulação. Por exemplo: um *timestep* de 6, irá realizar todos os cálculos a cada 10 minutos, pois se divide os 60 minutos presentes na hora por 6, resultando em 10 minutos. Nas simulações realizadas neste trabalho foi escolhido um *timestep* igual a 4.

Para poder realizar a comparação de custo operacional é necessário determinar a tarifa das fontes de energia elétrica que será aplicada ao modelo. O EnergyPlus possui um modelo onde são inseridos os dados das tarifas e como resultado da simulação tem-se o custo operacional do prédio. A definição da tarifa de energia elétrica foi baseada em tabelas de preço da concessionária Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE) e com as definições de grupos tarifários por ANEEL, 2005, foi utilizada uma tarifa do tipo horo-sazonal verde. A pesquisa realizada neste trabalho mostrou que essa estrutura tarifária é a mais utilizada nos empreendimentos do setor hoteleiro em Porto Alegre. Os valores utilizados como entrada de dados para a simulação são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3.8 - Tarifa de energia elétrica utilizada [www.ceee.com.br, acessado em 20/12/2012]

	Horo-sazonal Verde
Demanda (R\$/kW)	R\$ 6,7900
Energia Ponta (R\$/kWh)	R\$ 0,7690
Energia Fora Ponta(R\$/kWh)	R\$ 0,1499
ICMS	25,0%
PIS	1,5%
COFINS	3,5%

Para o gás natural foi utilizada a tarifa estabelecida pela Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul (Sulgás) de 1,7 R\$/m³. Considerando o poder calorífico inferior do gás natural de 35,22 MJ/m³ [Staffell, 2011] tem-se um custo energético de 0,17 R\$/kWh.

Os dados de tarifas e *timestep* mostrados acima foram aplicados igualmente para o modelo de referência e para o modelo com CHP (descrito no item 3.4).

3.3 Ajuste do Modelo de Referência com os Dados da Pesquisa

Antes de realizar a comparação de consumo energético e custo operacional entre o hotel com um sistema CHP e o hotel sem este sistema (modelo de referência), foi realizado um ajuste de consumo energético do modelo de referência. O intuito deste ajuste foi fazer com que o modelo computacional tivesse resultados próximos de resultados reais, levantados pela pesquisa. Para realizar este ajuste foi feita uma análise comparando os consumos energéticos anuais entre os resultados da pesquisa e o modelo de referência, alterando alguns parâmetros de entrada do modelo para aproximar estes consumos.

Como os resultados de consumo real já haviam sido definidos pelos dados da pesquisa e o modelo de referência utilizava dados de entrada baseados em normas e livros, foram selecionados alguns desses parâmetros, considerados de grande influência no consumo energético, para serem variados até se achar o consumo do modelo de referência próximo ao resultado da pesquisa. Para a escolha desses parâmetros foram levados em consideração a influência no desempenho energético da edificação e também a dificuldade de conhecer o valor deste parâmetro quando se trata de um prédio real. Por exemplo, a potência de equipamentos (computadores, impressoras, monitores) em uma sala de escritório: sabe-se que quanto maior essa potência, maior será o consumo energético da edificação. Em simulações de novos prédios, esse dado pode ser baseado nos valores apresentados por ASHRAE, 2009, porém quando se trata de uma edificação real pode-se achar valores muito diferentes dos apresentados.

O ajuste foi realizado separadamente nos dois principais consumos energéticos da edificação, primeiramente para o consumo de energia elétrica e em seguida no consumo de combustível que atende basicamente a demanda de água quente do prédio. Como não ocorre uma sinergia entre esses dois consumos, os ajustes puderam ser realizados totalmente independentes.

Os parâmetros que foram escolhidos para serem alterados até se chegar ao ajuste final do consumo de energia elétrica foram:

- Potência dos equipamentos (W/m^2)
- Potência do sistema de iluminação (W/m^2)
- COP do sistema dos equipamentos condicionadores de ar
- Temperatura de *set point* do sistema de de ar condicionado ($^{\circ}C$)

Já para o ajuste do consumo de combustível foram escolhidos:

- Vazão de água dos chuveiros (m^3/s)
- Temperatura de *set point* da água no boiler ($^{\circ}C$)
- Eficiência do boiler
- Volume do tanque do boiler (m^3)

Esses foram variados, respectivamente na ordem em que são listados. Foi realizada uma série de simulações sendo que em cada nova simulação era variado em um incremento um único parâmetro. Por exemplo, na primeira simulação foi alterada apenas a potência dos equipamentos em 25 % do valor original, o qual havia sido definido pelos dados apresentados por ASHRAE, 2009. Como o consumo de energia elétrica do modelo de referência era menor que os dados de consumo da pesquisa, essa potência foi elevada em 25 %.

Após cada simulação foi analisado o consumo anual por metro quadrado de área construída da edificação (kWh/m²) entre o modelo simulado e o dado real da pesquisa. Também foi analisado o R² do conjunto de dados compostos pelos consumos médios mensais de cada simulação comparados com os dados reais. Foi possível chegar a um valor final de consumo, tanto para energia elétrica quanto para combustível com variação menor que 1 % entre os resultados da simulação e os dados reais da pesquisa.

Nas tabelas abaixo, são apresentadas as simulações que foram realizadas até se chegar ao valor final de consumo do modelo de referência. Mostra-se o parâmetro que foi alterado em cada simulação e o seu incremento.

Tabela 3.9 - Simulações de ajuste de energia elétrica

Simulação	Parâmetro Alterado	Incremento	R² dos Consumos Médios Mensais	Consumo Anual (kWh/m²)	Varição em Relação aos Dados Reais
Dados Reais	-	-	-	57,94	-
Modelo Referência	-	-	0,5335	48,38	16,51%
Simulação 01	Pot. Equip.	+25%	0,5377	49,37	14,80%
Simulação 02	Pot. Equip.	+50%	0,5411	50,36	13,09%
Simulação 03	Pot. Ilum.	+5%	0,5468	51,76	10,67%
Simulação 04	Pot. Ilum.	+10%	0,5516	53,16	8,26%
Simulação 05	Pot. Ilum.	+15%	0,5555	54,56	5,84%
Simulação 06	Pot. Ilum.	+20%	0,5589	55,99	3,38%
Simulação 07	Pot. Ilum.	+25%	0,5616	57,40	0,94%

Tabela 3.10 - Simulações de ajuste de consumo de combustível

Simulação	Parâmetro Alterado	Incremento	R ² dos Consumos Médios Mensais	Consumo Anual (kWh/m ²)	Varição em Relação aos Dados Reais
Dados Reais	-	-	-	32,58	-
Modelo Referência	-	-	0,7250	29,15	10,51%
Simulação 08	Vaz. Chuv.	+5%	0,7252	30,60	6,07%
Simulação 09	Vaz. Chuv.	+10%	0,7255	32,05	1,62%
Simulação 10	Vaz. Chuv.	+12%	0,7256	32,62	-0,14%

No ajuste do consumo de energia elétrica foi possível chegar a um resultado de 0,94 % de diferença, entre o consumo anual dos dados reais e da simulação do modelo de referência, realizando sete simulações. Tal resultado foi alcançado apenas alterando a potência de equipamentos e de iluminação em 50 % e 25 %, respectivamente. O R² entre os consumos médios anuais não sofreu muita alteração pela proporcionalidade dos resultados nas diferentes simulações, chegando a um valor final de 0,5616. Essa proporcionalidade pode ser vista no gráfico abaixo, onde aparecem as curvas dos consumos médios mensais de cada simulação e dos dados da pesquisa. Pode ser visto que o formato da curva de cada simulação não se altera, apenas se desloca no eixo vertical do gráfico.

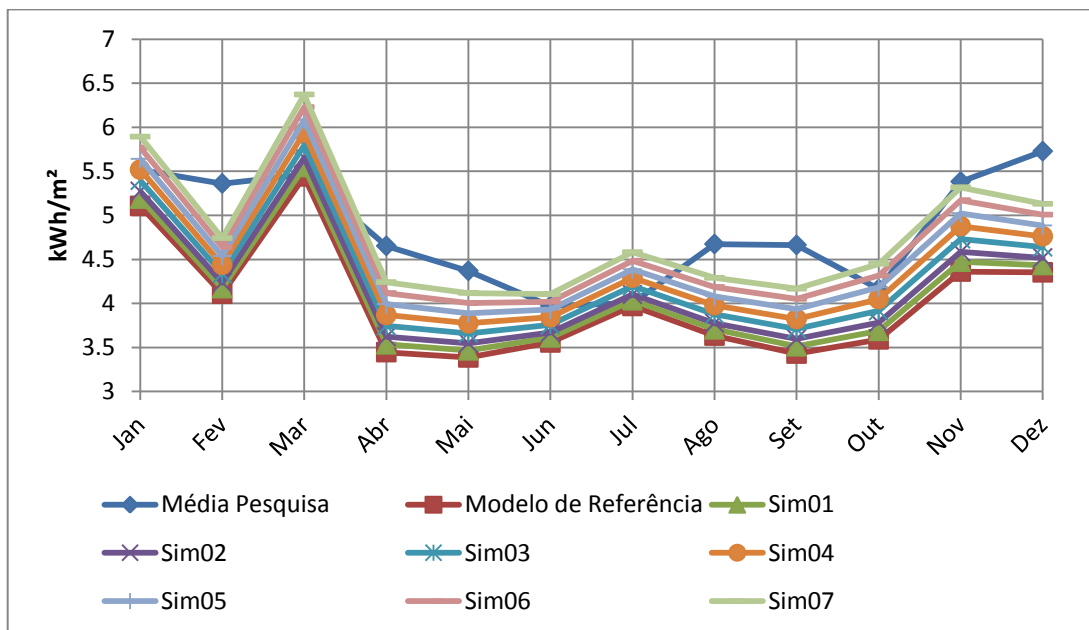


Figura 3.8 - Gráfico das simulações de ajuste de energia elétrica

Esse mesmo resultado da pequena variação de R^2 foi observado também no ajuste do consumo de combustível, no qual, com apenas três simulações e variando somente a vazão dos chuveiros em 12%, se achou uma variação de 0,14% entre o consumo anual de combustível levantado na pesquisa e o simulado no modelo de referência.

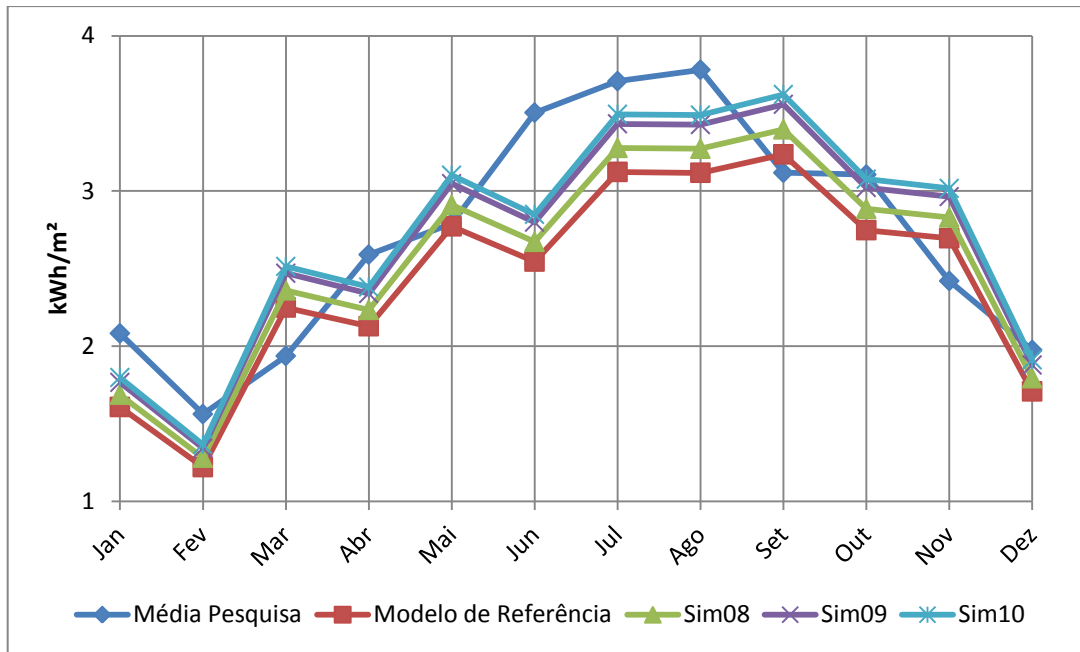


Figura 3.9 - Gráfico das simulações de ajuste de consumo de combustível

Uma outra maneira de enxergar a comparação entre os consumos médios mensais dos dados reais e dos dados simulados foi através da análise de um gráfico com o perfil anual de consumo junto a linhas de tendência. Foram utilizadas linhas de tendência polinomiais de grau seis para melhor se aproximar dos perfis anuais de consumo de energia.

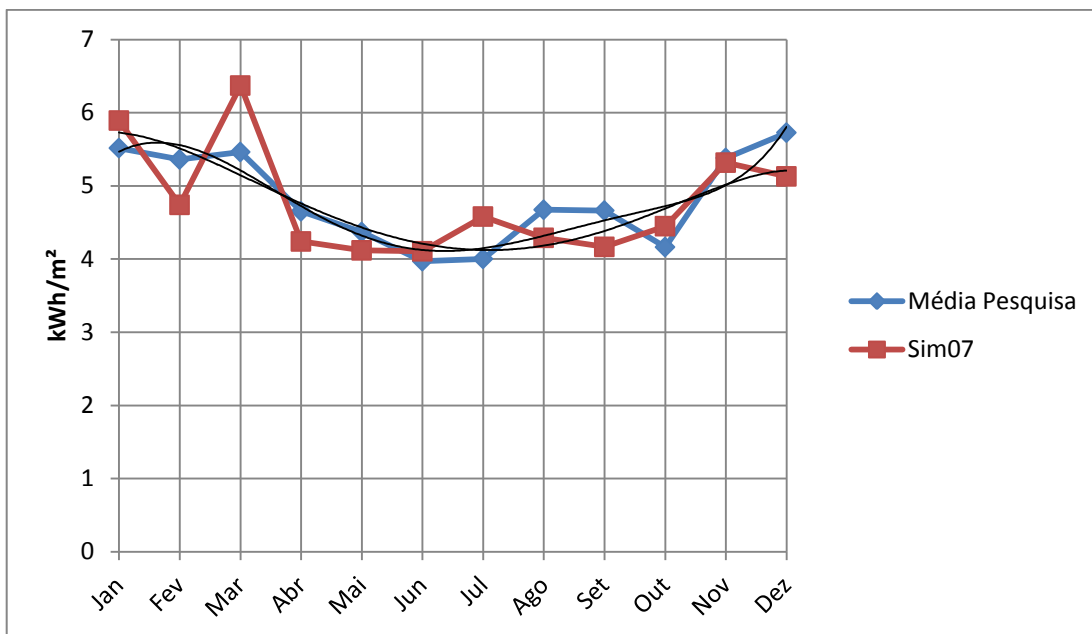


Figura 3.10 - Perfil Anual de consumo de energia elétrica com linhas de tendência

É possível ver que as linhas de tendência estão quase sobrepostas, mostrando uma boa qualidade no ajuste de dados. O gráfico também mostra que o perfil de consumo anual é muito parecido entre os dados simulados e os dados reais, devido ao fato de que o perfil desse consumo tem duas principais influências: clima local e taxa de ocupação da edificação. Neste caso, a taxa de ocupação do hotel foi baseada nos dados apresentados por BEMTUR, 2012, e, como mostrado anteriormente, esses dados tiveram grande semelhança com os dados de ocupação da pesquisa. Já o clima utilizado para a simulação vem de um arquivo climático que tem representação estatística do clima local.

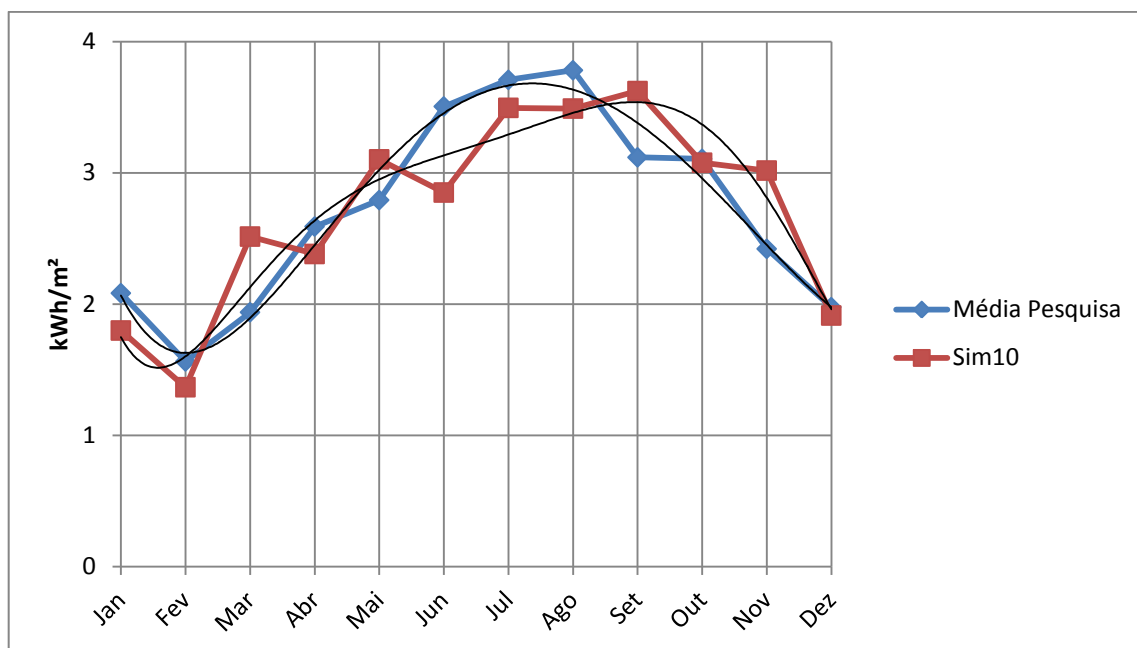


Figura 3.11 - Perfil Anual de consumo de combustível com linhas de tendência

Nesta comparação do consumo de combustível pode-se observar que existe uma diferença em relação ao pico de consumo. Isso acontece pois pode haver uma imprecisão na temperatura da água da rede que foi considerada para a simulação, já que esse dado vem de uma correlação apresentada por Hendron et al., 2004. No entanto, os perfis de consumo de combustível entre os dados simulados e os dados da pesquisa são bastante semelhantes, como mostrado no gráfico acima.

Como última análise realizada para conferir o resultado do ajuste entre as simulações e os dados apresentados pela pesquisa, foram calculadas as médias dos consumos (kWh/m²) médios mensais. Foi visto que para a energia elétrica se chegou a um valor de 8,73 % de diferença e para consumo de combustível, 12,7 % como mostram as tabelas abaixo.

Tabela 3.11 - Média das variações de consumo médio mensal para energia elétrica

	Dados Pesquisa (kWh/m ²)	Sim07 (kWh/m ²)	Dif. mensal (%)
Jan	5,52	5,89	6,82%
Fev	5,36	4,74	11,57%
Mar	5,46	6,37	16,63%
Abr	4,65	4,24	8,85%
Mai	4,37	4,12	5,74%
Jun	3,97	4,11	3,40%
Jul	4,00	4,58	14,44%
Ago	4,67	4,29	8,22%
Set	4,66	4,17	10,65%
Out	4,16	4,45	6,87%
Nov	5,38	5,32	1,20%
Dez	5,73	5,13	10,44%
		Média	8,73%

Tabela 3.12 - Média das variações de consumo médio mensal para energia térmica

	Dados Pesquisa (kWh/m ²)	Sim10 (kWh/m ²)	Dif. mensal (%)
Jan	2,08	1,80	13,65%
Fev	1,56	1,37	12,57%
Mar	1,94	2,51	29,78%
Abr	2,59	2,38	8,07%
Mai	2,79	3,10	11,12%
Jun	3,50	2,85	18,71%
Jul	3,71	3,49	5,75%
Ago	3,78	3,49	7,72%
Set	3,12	3,62	16,19%
Out	3,11	3,08	0,95%
Nov	2,42	3,02	24,64%
Dez	1,98	1,91	3,21%
		Média	12,70%

Com os ajustes realizados e descritos anteriormente, o modelo de referência foi definido e seus parâmetros travados para se realizar as comparações energéticas e de custo operacional com o hotel utilizando um sistema de CHP.

3.4 Modelo do Hotel com CHP

A partir do modelo de referência descrito no item 3.2 com os ajustes supracitados, foi proposto o modelo que utiliza a cogeração para realizar as comparações energéticas e análises de viabilidade econômica. Neste modelo todos os parâmetros que determinam as demandas de energia térmica e elétrica foram mantidos exatamente iguais ao modelo de referência para se ter uma boa qualidade de comparação, porém foi inserido o modelo de CHP para atender essas demandas energéticas.

Como foi visto na pesquisa que as únicas demandas energéticas que os hotéis apresentam são de energia térmica - apenas para aquecimento de água -, e energia elétrica, optou-se por um sistema de CHP que supra essas demandas. O regime de operação selecionado foi definido a partir da constatação de que a tarifação dos hotéis é horosazonal com valores de energia bem mais caros em horário de ponta. Inclusive alguns dos hotéis pesquisados já possuem um sistema com motogeradores que atendem a total demanda de energia elétrica em horário de ponta e ficam desligados fora dele. Com base nessas informações decidiu-se utilizar um regime de operação em que o motogerador produz energia elétrica acompanhando a demanda do prédio apenas em horário de ponta. Fora dela, o sistema fica desligado e a demanda é atendida pela concessionária de energia elétrica. O aproveitamento de energia térmica se dá dependendo da operação do motor. Por esse motivo é importante a presença do tanque acumulador descrito no item 3.2 e de um aquecedor auxiliar. Esse aquecedor é o mesmo boiler que o modelo de referência possui, porém irá funcionar apenas quando a energia térmica produzida pela cogeração não for suficiente para suprir sua demanda.

Para simular o sistema com CHP foi necessário informar os dados ao modelo descrito no item 2.4, onde é necessário informar as eficiências das correntes energéticas do motogerador, em função do seu regime de operação. Por exemplo, um equipamento que tem uma eficiência de 30 % na produção energia elétrica funcionando com 100 % da sua capacidade nominal, não terá essa mesma eficiência funcionando com 50 % da capacidade. E do mesmo jeito para as eficiências na recuperação de calor pelos gases de escapamento, água de arrefecimento e óleo de lubrificação.

O modelo simulado com o EnergyPlus calcula essas eficiências através das equações 2.5, 2.7, 2.8, 2.10, 2.11. Para se achar os coeficientes a, b, c, d, e, foi feito um ajuste de

equação pelo método dos mínimos quadrados com as informações tiradas de um catálogo de fabricante de motogerador. Abaixo são mostrados os dados das quantidades de energia (em porcentagem da energia total disponibilizada pela queima do combustível) presente nas correntes energéticas, ajustados incorporando as considerações descritas a seguir, do motor que foram utilizados para ajustar as equações informadas no modelo simulado.

Tabela 3.13 - Dados ajustados de desempenho do motogerador [adaptado de Waukesha, 2010]

PLR	Eficiências			
	Energia Elétrica	Calor no Óleo de Lubrificação	Calor na Água de Arrefecimento	Calor nos Gases de Exaustão
100%	37%	3%	21%	16%
96%	36%	3%	22%	16%
87%	36%	3%	22%	16%
81%	35%	3%	22%	16%
67%	34%	3%	23%	16%
54%	33%	4%	25%	15%
40%	30%	4%	27%	15%
27%	27%	6%	30%	14%

Onde PRL (*Part Load Ratio*) é o regime de operação em função da capacidade nominal do motor. Para se chegar nestes dados existem algumas considerações estabelecidas para se chegar aos valores da tabela 4.13:

- Efetividade da recuperação de calor de 85 %;
- Temperatura de saída dos gases de exaustão após a caldeira de recuperação igual a 150 °C;
- Rotação do motor fixada em 1800 RPM para produzir corrente elétrica alternada com 60 Hz

O fabricante informa a energia total disponível nos gases de exaustão, porém esse dado depende da temperatura dos gases de exaustão e sua vazão, e leva em consideração a temperatura dos gases após a caldeira de recuperação. O valor da energia recuperada nos gases é encontrado pela seguinte equação:

$$E_{rec} = \left(\dot{m}_{exhaust} C_p (T_{exhaust} - T_{in}) \right) \eta_{rec} \quad (4.3)$$

onde E_{rec} é a taxa de energia recuperada dos gases de exaustão, [W], $\dot{m}_{exhaust}$ é a vazão dos gases de exaustão, [kg/s], C_p é o calor específico dos gases de exaustão, [J/kg.K], $T_{exhaust}$ é a temperatura dos gases na exaustão, [K], T_{in} é a temperatura dos gases após a caldeira de recuperação, [K] e η_{rec} é a eficiência da caldeira de recuperação.

A temperatura dos gases na exaustão e a sua vazão também são fatores que variam conforme o regime de operação do motor. Os dados utilizados para se chegar aos valores de energia na recuperação dos gases de exaustão da tabela 4.13 são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 3.14 - Dados dos gases de exaustão [Waukesha, 2010]

PLR	Temperatura do Gases na Exaustão (K)	Vazão dos Gases na Exaustão (kg/s)
100%	722	0,524
96%	721	0,502
87%	720	0,461
81%	719	0,435
67%	715	0,370
54%	712	0,305
40%	708	0,241
27%	704	0,178

Com esses dados, os valores dos coeficiente encontrados através do ajuste da equação foram:

Tabela 3.15 - Coeficientes das equações ajustadas

	Energia Elétrica	Calor no Óleo de Lubrificação	Calor na Água de Arrefecimento	Calor nos Gases de Exaustão	Temperatura de Exaustão
Coef.1	0,19263	0,08101	0,37197	0,12621	695,22299
Coef.2	0,33295	-0,10970	-0,31363	0,06037	39,47048
Coef.3	-0,16124	0,05538	0,15702	-0,02429	-11,48409

No gráfico abaixo pode-se ver as eficiências das correntes energéticas em função do regime de operação.

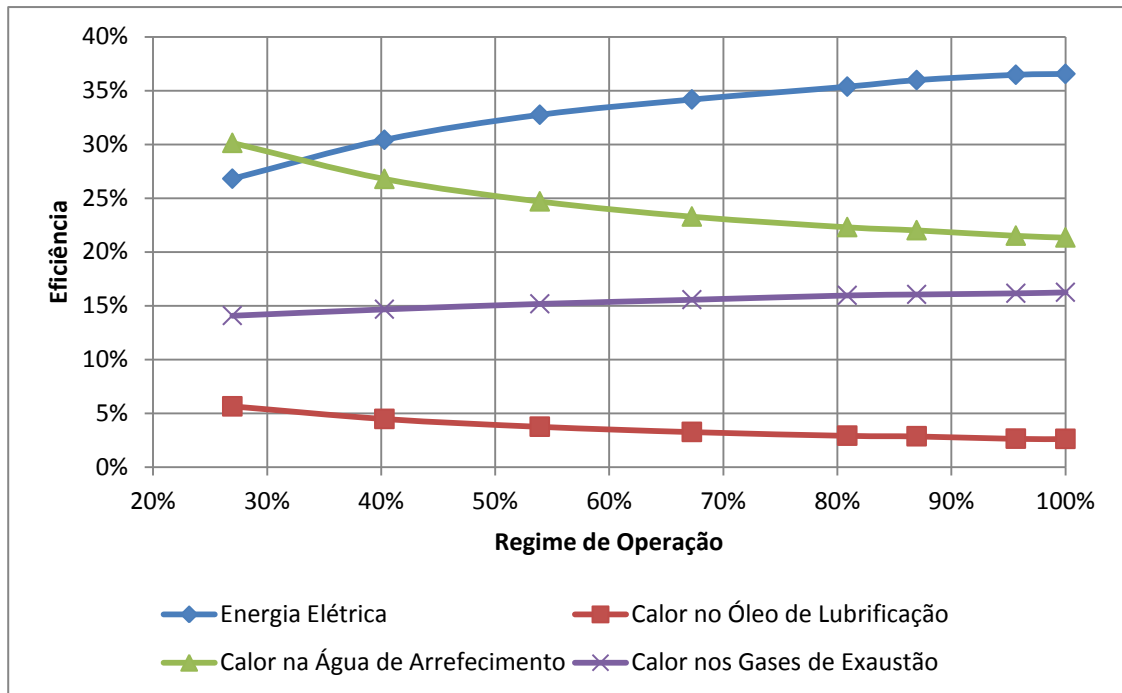


Figura 3.12 - Gráfico das eficiências do motogerador

Uma comparação que pode ser feita, e que mostra o quanto a cogeração se torna mais eficiente com a configuração proposta nesse trabalho, é entre a eficiência apenas da produção de energia elétrica e a eficiência máxima aproveitando todas as outras correntes energéticas. A utilização do motogerador apenas para produção de energia elétrica é de uso comum em edificações, principalmente para *back up* de emergência ou para redução do consumo e demanda em horários de ponta. Com a aplicação da cogeração, no caso do equipamento utilizado neste trabalho [Waukesha, 2010], se passa de uma eficiência média de 34 % para 77 %.

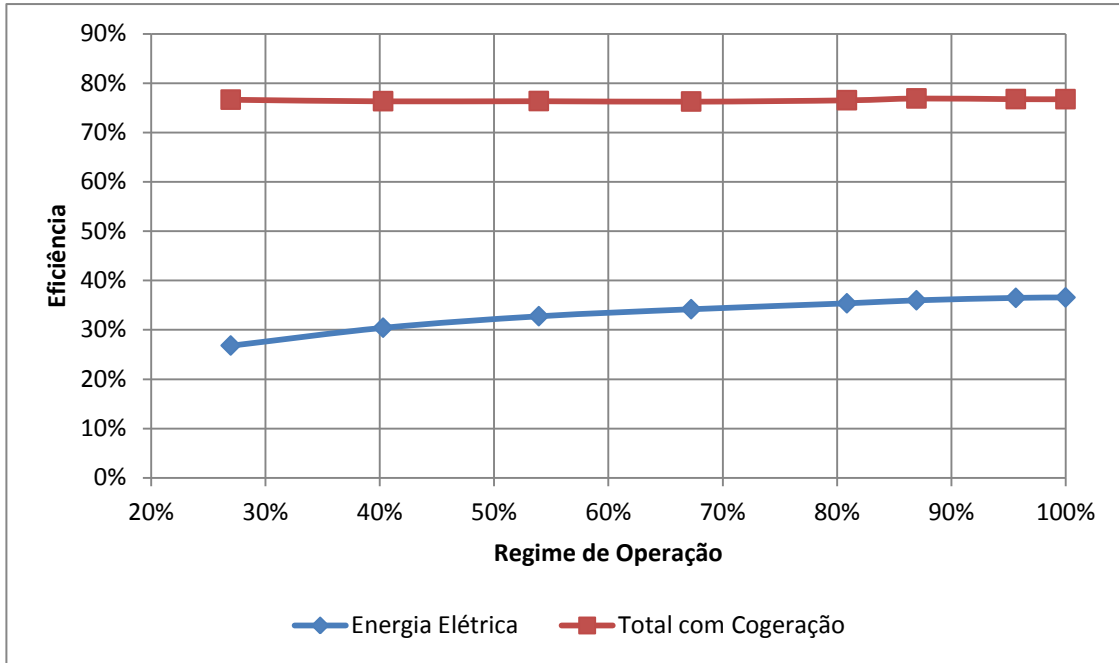


Figura 3.13 - Gráfico das eficiências de produção de energia elétrica e eficiência total utilizando a cogeração

4 RESULTADOS

Os resultados do trabalho foram divididos em três diferentes análises: primeiramente foi realizada uma comparação energética entre o modelo de referência e o modelo com a cogeração; depois foi feita a análise de viabilidade econômica da implantação do sistema de CHP e por ultimo foram analisados uma série de diferentes cenários, variando algumas características desses modelos, para se entender o comportamento de uma forma que abrangesse uma série de possibilidades de viabilidade econômica.

4.1 Comparação Energética

Como primeira análise na comparação entre o modelo de referência e o modelo com a cogeração é muito importante conhecer e estudar a fundo os consumos energéticos dos dois modelos. Como o objetivo principal da aplicação do sistema de CHP é obter uma redução de custo operacional do prédio, obviamente além da comparação energética é fundamental analisar os custos da compra dessa energia que alimenta o hotel. Porém a análise energética foi realizada, neste capítulo, separadamente dos custo operacionais para se conhecer bem os perfis e quantidades de demanda e o consumo de energia elétrica e térmica. Pode-se ver que em um cenário com o sistema de CHP, onde se obtém um menor custo operacional em relação ao prédio sem este sistema, o consumo energético não necessariamente é menor. Isso se dá pela configuração de tarifas utilizadas e regimes de operação dos sistemas envolvidos.

Primeiramente foi analisado o consumo total dos dois modelos. Esse consumo total inclui energia elétrica e gás natural, onde os resultados são mostrados em valores de energia (kWh) e normalizados por área (kWh/m²). No caso do modelo com CHP mostra-se o consumo total sem descontar a energia elétrica produzida pela central cogeneradora e também o consumo líquido, onde essa energia produzida é subtraída do consumo total.

Tabela 4.1 - Consumo total e líquido

	Total		Líquido	
	Consumo Total (kWh/ano)	Consumo Total (kWh/m ² .ano)	Consumo Total (kWh/ano)	Consumo Total (kWh/m ² .ano)
Modelo de Referência	750635	90,02	750635	90,02
Modelo com CHP	881437	105,71	803908	96,41

É visto, neste caso, que o modelo com CHP possui um consumo maior (96,41 kWh/m²) que o modelo de referência (90,02 kWh/m²). Mesmo que o modelo com CHP tenha um potencial de obter um custo operacional menor (análise mostrada no item 4.2) ao modelo de referência, este cenário se enquadra no caso de apresentar consumo maior, como descrito no parágrafo anterior.

A explicação para esse maior consumo do sistema com a cogeração está no fato de que a energia elétrica produzida pelo motogerador possui uma eficiência na ordem de 35 %, ou seja para cada unidade de energia elétrica produzida é necessário 2,85 unidades de energia consumida através do combustível que alimenta este motor. Já no caso da energia elétrica comprada da concessionária, pode-se considerar essa eficiência de 100 % pois para cada unidade de energia elétrica consumida será cobrada uma unidade ao consumidor. E mesmo utilizando a cogeração onde a eficiência total do sistema chega na casa de 75 %, esta continua sendo menor que as eficiências do modelo de referência, onde a elétrica é de 100 % e a térmica de 80 % referente à eficiência do boiler.

Para saber melhor como se dá o funcionamento do sistema de CHP foi analisada a quantidade de energia elétrica e térmica produzida pelo equipamento e comparado com o consumo do prédio para saber o quanto desse consumo foi suprido.

Tabela 4.2 - Produção de energia do CHP

	Energia Elétrica (kWh/ano)	Energia Térmica (kWh/ano)
Consumo do Prédio	479115	266793
Modelo com CHP	77528	94812
Fração do Consumo Suprido pelo CHP	16%	36%

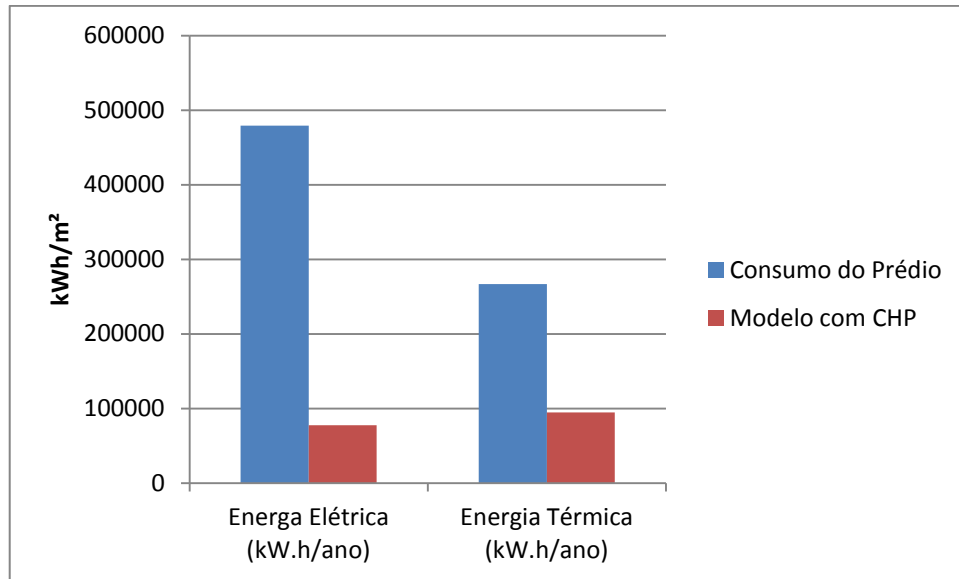


Figura 4.1 - Produção de energia do CHP

Nota-se que a fração suprida de energia elétrica chega a um valor de 16 % mesmo funcionando apenas três horas durante o dia. Se for feita uma comparação com a fração que essas três horas representam nas vinte e quatro horas totais de um dia, equivalente a 12,5 %, observa-se que a fração de energia elétrica suprida foi maior. Este fato é um indicativo de que existe uma distribuição de demanda de energia elétrica com maiores valores durante essas três horas em que o CHP está funcionando. Esta constatação mostra que este caso tem um bom potencial para alcançar uma importante redução de custo operacional com o motogerador funcionando. Esta mesma conclusão não pode ser aplicada à energia térmica, devido à presença do termo acumulador (tanque de água quente) incluído no sistema. Este, faz com que a energia produzida pelo CHP possa ser utilizada em horários diferentes de sua produção.

Outra análise realizada do funcionamento do CHP está relacionada às curvas de performance descritas no item 3.4. Foi analisada a quantidade de energia elétrica e térmica produzida pelo CHP e comparada com a quantidade de energia consumida para operar o sistema (queima de gás natural), para se conhecer a eficiência anual da operação do sistema.

Tabela 4.3 - Eficiência na produção de energia do CHP

	Consumo Gás no CHP (kWh/ano)	Produção de Energia Elétrica (kWh/ano)	Produção de Energia Térmica (kWh/ano)
	230342	77528	94812
Eficiências	-	34%	41%

Essas eficiências foram comparadas com os dados de performance estabelecidos pelas curvas. As eficiências das curvas podem ser vistas na tabela abaixo:

Tabela 4.4 - Eficiências das curvas de performance do CHP

PLR	Energia Elétrica	Energia Térmica
100%	37%	40%
96%	36%	40%
87%	36%	41%
81%	35%	41%
67%	34%	42%
54%	33%	44%
40%	30%	46%
27%	27%	50%

Pode-se perceber que as eficiências anuais dos resultados da simulação do modelo com CHP ficaram próximas das eficiências apresentadas para 67 % da carga parcial mostrada pelos dados de performance do equipamento. Para entender esse resultado foi analisado o *output* da simulação o qual mostra a faixa de operação do sistema a cada hora do ano. Foi constatado que o equipamento operou durante 753 horas no ano e com uma média de 61,7 % da sua capacidade nominal. Abaixo é mostrada a distribuição de frequências de operação do CHP:

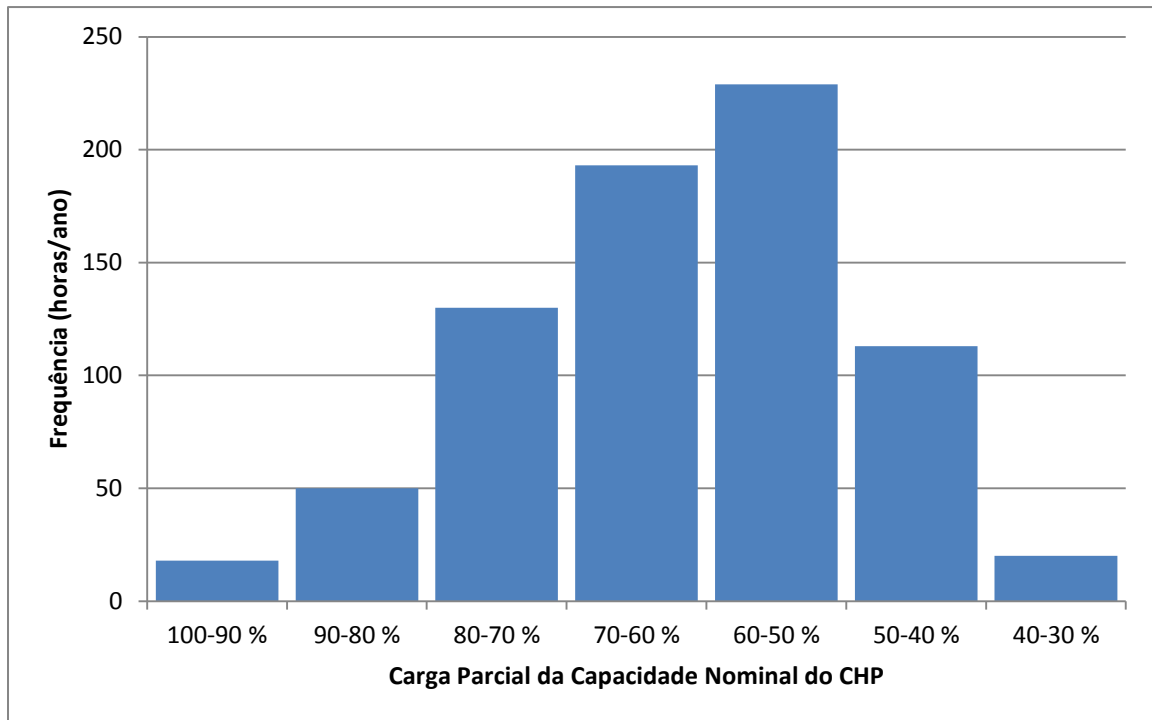


Figura 4.2 - Distribuição de frequências de operação do CHP

Portanto, com essa análise, conclui-se que o equipamento teve operação entre os 67 % e 54 % da capacidade nominal mostrados na tabela 5.4, obtendo eficiências anuais de 34 % para energia elétrica e 41 % para energia térmica.

Para ir mais a fundo no funcionamento do CHP foi analisado o perfil diário de demanda de energia elétrica e térmica e comparado entre os dois modelos. Foram escolhidos os dias de maior e menor temperatura média diária para se estudar esses comportamentos. O dia que teve maior média de temperatura do ar externo foi dia 01 de fevereiro, com temperatura média de 28,7 °C. O dia com menor temperatura média foi dia 08 de junho, com uma média de 7,1 °C, porém esse dia foi durante um final de semana em que o sistema de CHP não é operado já que não há horário de ponta. Por tanto foi escolhido o dia com segunda menor média de temperatura diária que foi dia 04 de junho, com média de 7,9 °C.

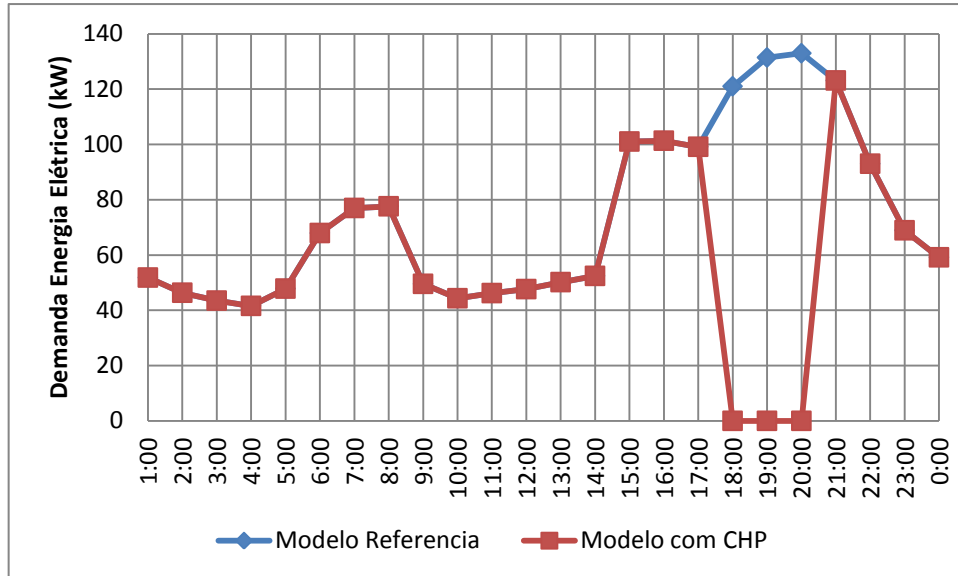


Figura 4.3 - Perfil de demanda de energia elétrica do dia 01 de Fevereiro

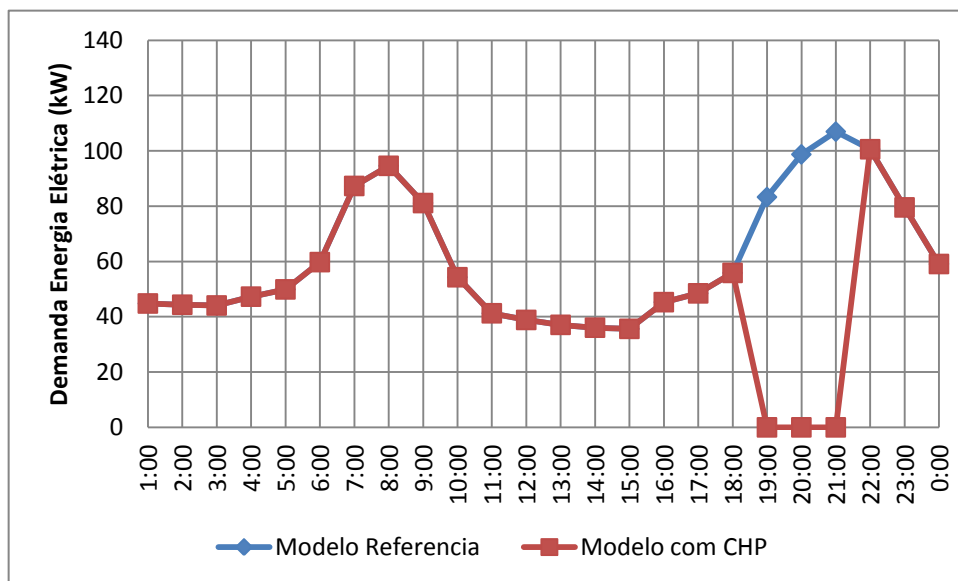


Figura 4.4 - Perfil de demanda de energia elétrica do dia 04 de Junho

É visto que o perfil de demanda de energia elétrica do hotel é parecido no período do verão e do inverno, com maiores picos durante o verão. Esse comportamento se deve à demanda de energia do sistema de ar condicionado, que tem maior utilização durante o verão. Os dois picos presentes no perfil de demanda ocorrem no começo do dia e no final da tarde, que são os horários de maior ocupação do hotel. Durante o horário comercial (8:00 até as 18:00) a grande maioria dos hóspedes não estão ocupando o prédio.

Também é interessante notar que, no modelo com CHP, durante o horário de ponta a demanda é nula pois a energia elétrica é suprida 100 % pelo motogerador. Confirmando a constatação da página 59, é visto que a maior demanda está presente no horário de ponta, fazendo com que esse empreendimento tenha uma boa aplicação para a geração de energia elétrica em horário de ponta, onde as tarifas ficam mais caras. Esse fato está aliado a viabilidade econômica da implantação do sistema com cogeração.

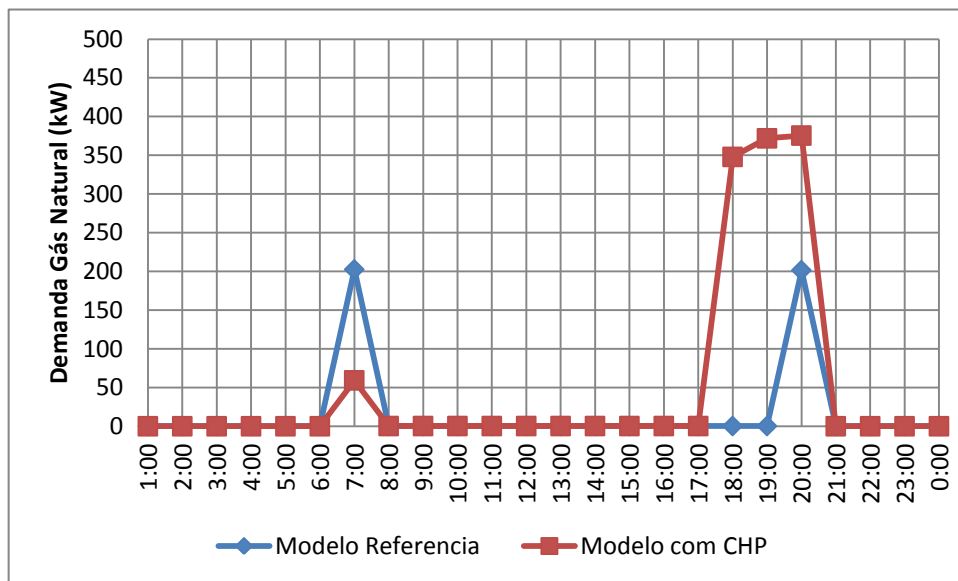


Figura 4.5 - Perfil de demanda de gás natural do dia 01 de Fevereiro

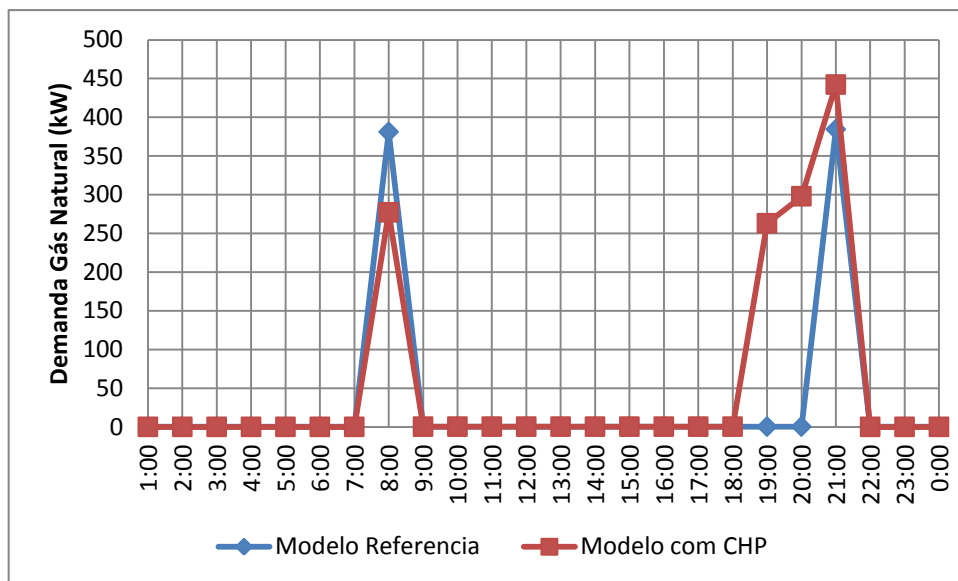


Figura 4.6 - Perfil de demanda de gás natural do dia 04 de Junho

Para analisar o perfil diário da demanda de energia térmica foram expostas nos gráficos acima as demandas de gás natural dos dois modelos. No caso do modelo de referência, o gás natural atende apenas a demanda de energia térmica do prédio, já no modelo com CHP, atende também o funcionamento do motogerador.

Pode-se ver que nos dois dias e nos dois modelos existem dois picos de demanda, um no começo do dia e outro no final da tarde. Esse picos ocorrem no horário em que os hóspedes estão tomando banho e, no caso do modelo com CHP, o pico do final da tarde é incrementado com o funcionamento do motogerador em horário de ponta. Quanto ao modelo de referência os dois picos diários são iguais.

O pico do início do dia no modelo com CHP é menor que do modelo de referência pois existe energia termo acumulada no tanque de água quente. Essa energia é fornecida pelo aproveitamento de calor na cogeração do dia anterior. Pode-se notar que no dia de inverno essa diferença é menor devido ao fato de que houve menor demanda de energia elétrica no horário de ponta e, conseqüentemente, menor produção de energia térmica para ser termo acumulada. Outro fato que contribui para essa menor diferença no dia de inverno é que a demanda de energia térmica é maior em relação ao dia de verão, principalmente por que a temperatura da água distribuída na rede é menor no inverno.

Para entender melhor como se dá essa acumulação no tanque de água quente durante um dia, foi analisada a variação diária da temperatura da água dentro do tanque. Foi escolhido o mesmo dia de inverno citado anteriormente pois é onde existe a maior demanda de energia térmica.

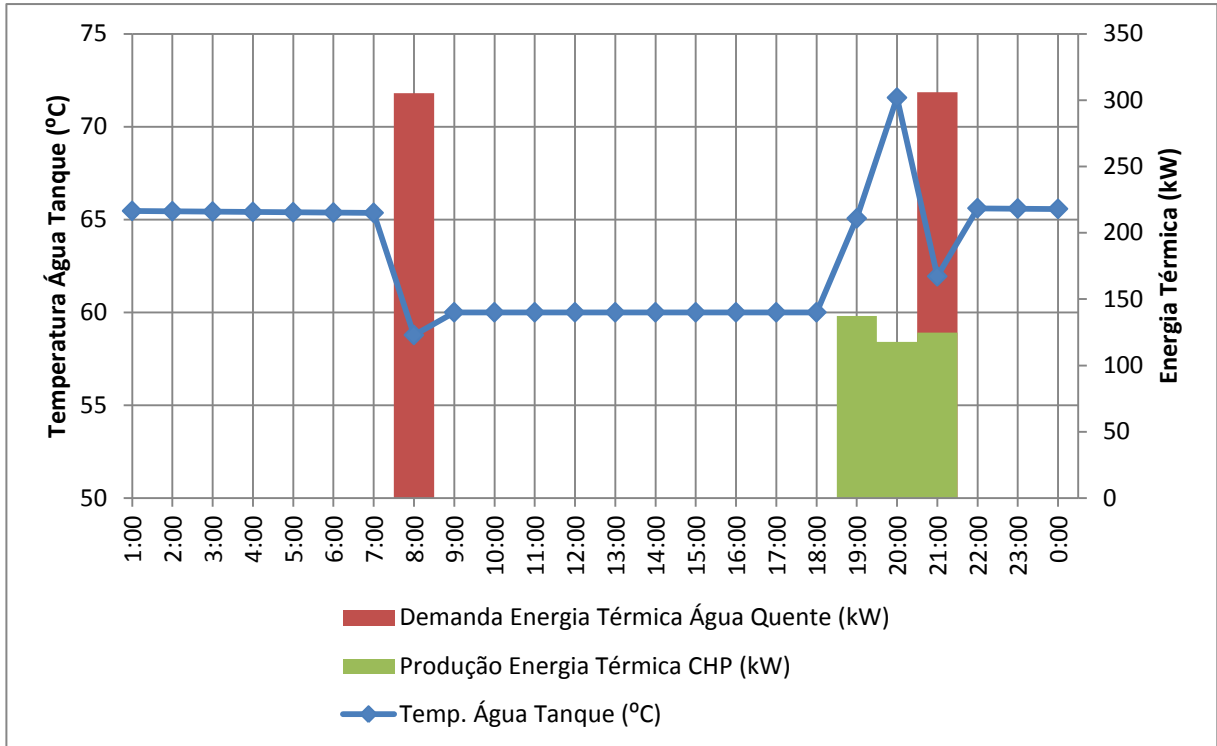


Figura 4.7 - Variação diária da temperatura da água do tanque

No gráfico acima é mostrada a variação da temperatura da água do tanque junto com a demanda de energia térmica, exclusiva para o aquecimento de água, e a produção de energia térmica com a cogeração no modelo com CHP.

Pode ser visto que antes do primeiro pico da manhã a água está a 65 °C, 5 °C a mais que a temperatura que o termostato deve atingir devido à energia termo acumulada do dia anterior. Quando ocorre o primeiro pico de demanda a temperatura cai um pouco abaixo dos 60 °C então o aquecedor auxiliar entra em operação para elevar a temperatura para 60 °C. Assim fica claro de entender por que a diferença dos picos de demanda de gás natural, no período da manhã, entre o modelo de referência e o modelo com CHP. No caso do modelo de referência a temperatura da água está a 60 °C, comparado com os 65 °C do modelo com CHP, antes do pico e o boiler necessita consumir mais gás natural para trazê-la de volta aos 60 °C após o consumo de água quente.

No caso do segundo pico de demanda diário a temperatura da água sobe próxima aos 72 °C pois é o momento em que o CHP está produzindo energia térmica. Logo após há uma queda devido ao consumo de água quente no hotel. É possível observar que no caso deste dia analisado a temperatura não baixou de 60 °C, fazendo com que não seja necessária a operação

do aquecedor auxiliar. Aparentemente, esse fato é verdadeiro, porém, para isso ser verdade o perfil de demanda de gás do gráfico 5.6, no horário de operação do CHP, deveria ter o mesmo formato que o perfil de demanda de energia elétrica do gráfico 5.4, pois o gás natural estaria sendo consumido apenas para funcionar o motogerador, cuja operação acompanha a demanda de energia elétrica. Pode-se ver que esses perfis não têm o mesmo formato na terceira hora de operação. Esse fato é um indicativo de que o aquecedor auxiliar entrou em operação nesta última hora. Para entender por que houve essa operação do aquecedor auxiliar foi analisado um gráfico da temperatura da água, durante esse período, a cada *timestep* da simulação.

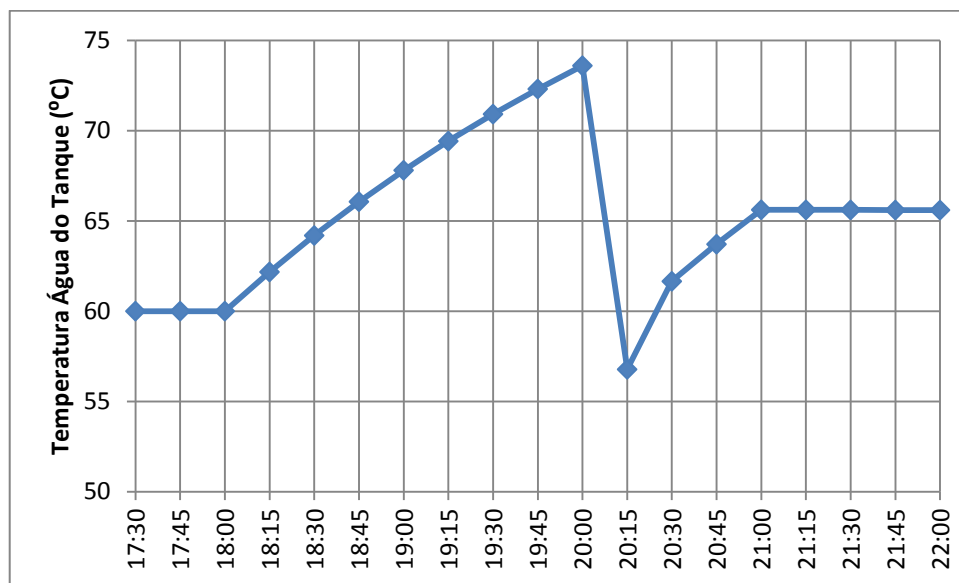


Figura 4.8 - Temperatura da água quente a cada *timestep* do modelo com CHP no dia 04 de Junho

Neste gráfico é visto que às 20:15 a temperatura cai abaixo dos 60 °C deixando claro que o aquecedor auxiliar entrou em operação neste período. A razão de não aparecer esse detalhe no gráfico 5.7 é que os dados da temperatura foram mostrados a cada hora, sendo assim o valor da temperatura na hora é uma média dos valores da temperatura a cada *timestep* que compõe essa hora. Neste caso, a média dos *timesteps* das 20:15, 20:30, 20:45 e 21:00, que compõe a média da hora 21:00 é igual a 61,93 °C e a temperatura 56,77 °C das 20:15 fica escondida nesta média. Isso significa que o gráfico 5.7 pode conter algumas peculiaridades como esta, porém não deixa de conter muitas informações válidas a respeito do funcionamento do sistema, que é o objetivo da análise neste capítulo.

Uma avaliação muito comum quando se trabalha com desempenho energético de edificações é do consumo dos usos finais da energia no prédio. Essa investigação serve para saber onde estão os principais consumos e as oportunidades de melhorias. No caso do presente trabalho, esta análise foi realizada com o intuito de conhecer o comportamento do prédio e de quantificar esses consumos comparando-os com a produção de energia realizada pela unidade cogeneradora. São vistos no gráfico abaixo os consumos dos usos finais dos dois modelos lado a lado e a produção de energia no CHP:

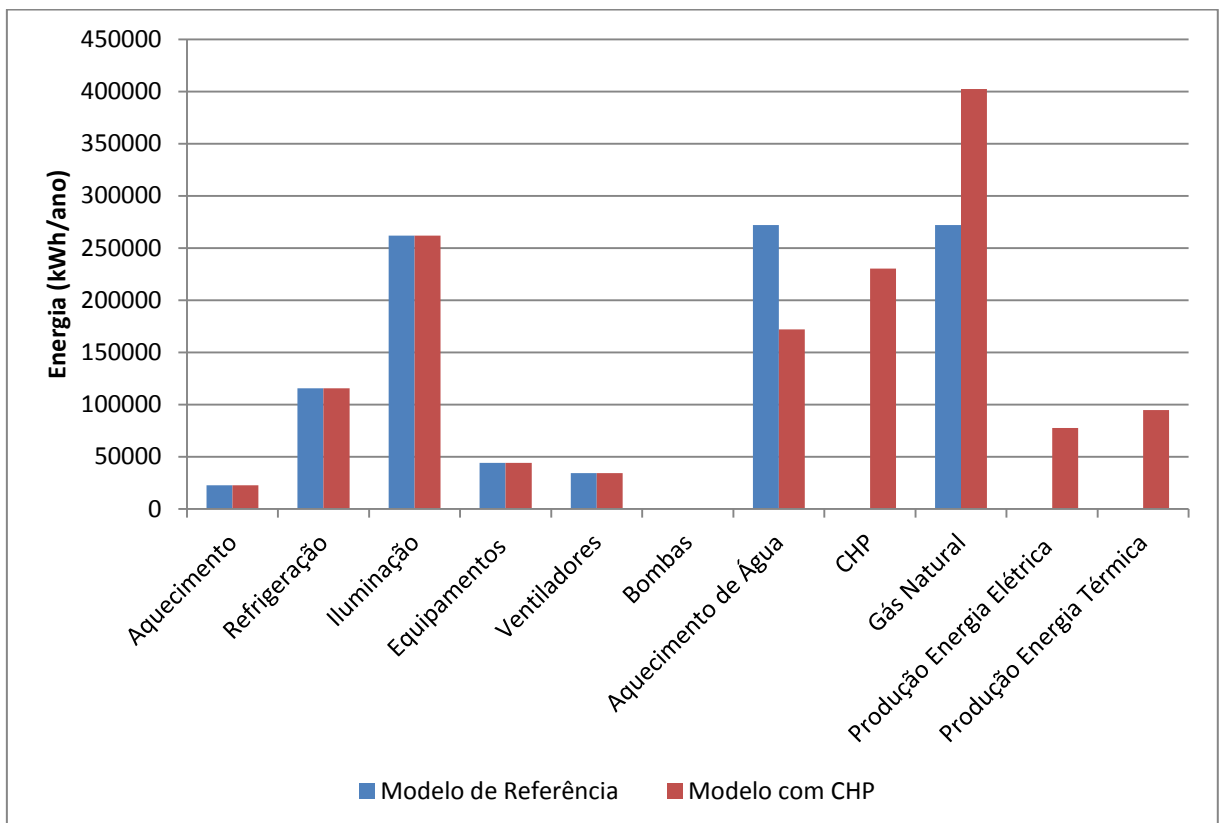


Figura 4.9 - Consumos dos usos finais e produção de energia

Observa-se que consumos desde o aquecimento até as bombas, no gráfico, são praticamente iguais nos modelos de referência e com CHP, com uma pequena diferença nas bombas devido à configuração do sistema. O consumo de aquecimento de água no modelo com CHP é menor pois não considera a energia térmica produzida pela cogeração, porém, ao somar-se esta energia, esses consumos são praticamente os mesmos nos dois modelos. Esses consumos semelhantes suprem as necessidades operacionais do prédio e são essenciais para seu funcionamento, por esse motivo são similares nos dois modelos. A partir do consumo do

CHP é que existe diferenças nos modelos, obviamente o modelo de referência não apresenta consumo com cogeração. Já no gás natural o consumo do modelo com CHP se dá pelo funcionamento do motogerador mais o aquecedor auxiliar (boiler) de água quente, no modelo de referência é apenas para aquecimento de água. Pode-se notar, no gráfico, que esse consumo é o mesmo ao consumo de aquecimento de água. As duas últimas colunas mostram para fins de comparação a energia produzida no modelo com CHP. No gráfico abaixo mostra-se esses consumos, os quais são iguais nos dois modelos, mês a mês:

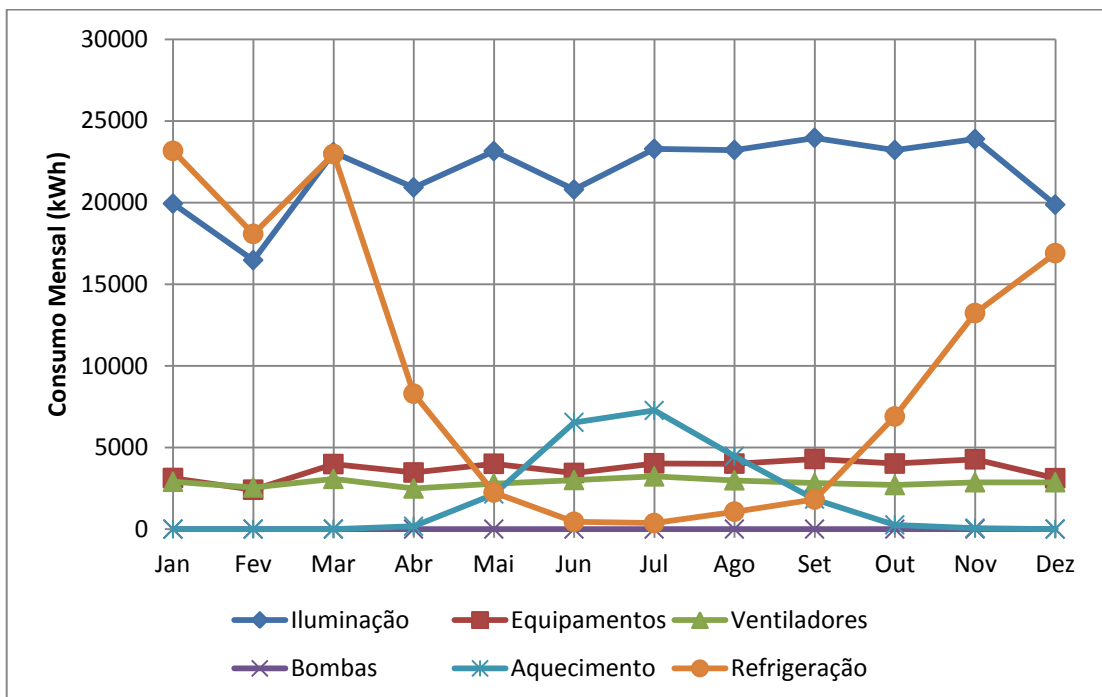


Figura 4.10 - Consumos dos usos finais da energia mensais

Este gráfico confirma que o principal consumo que apresenta sazonalidade é o consumo do sistema de ar condicionado. Os outros consumos dependem principalmente do nível de ocupação do hotel. Outro consumo, que não foi mostrado no gráfico anterior mas que apresenta sazonalidade, é o consumo para aquecimento de água. O mesmo é apresentado no gráfico abaixo, para os dois modelos, junto com a produção de energia térmica do CHP:

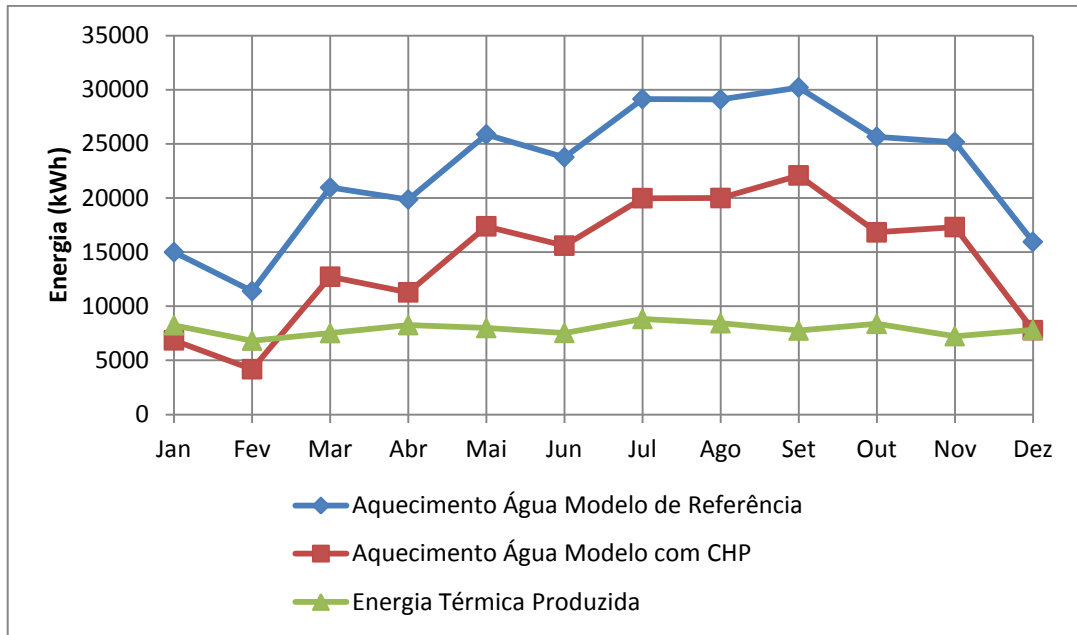


Figura 4.11 - Consumo de aquecimento de água e produção de energia térmica

Como se nota a diferença entre os consumos dos dois modelos é aproximadamente constante ao longo do ano. Essa diferença é suprida, no modelo com CHP, pela produção de energia térmica do mesmo, que também apresenta comportamento constante ao longo do ano.

Para entrar na análise de custo (realizada no item 4.2 junto com a viabilidade econômica) é fundamental expor quais são as energia compradas pelo empreendimento. No gráfico abaixo são mostradas as duas fontes de energia que são compradas pelo hotel nos dois modelos.

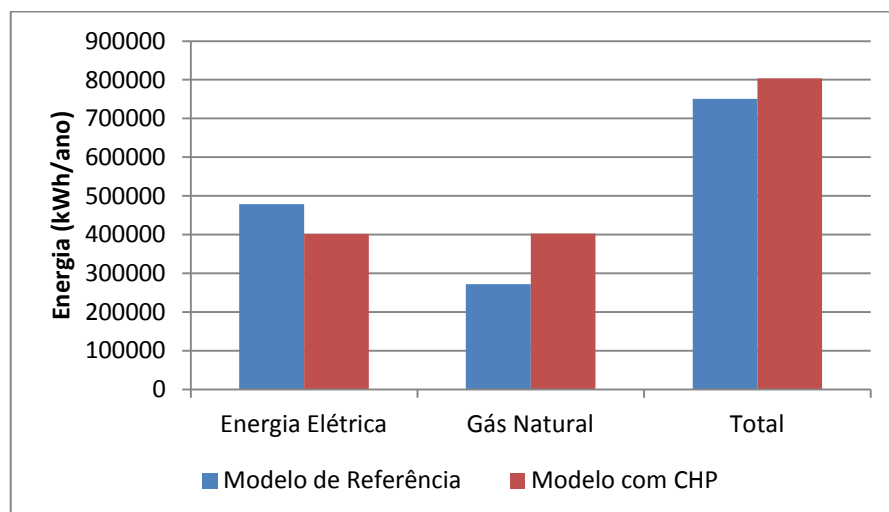


Figura 4.12 - Energia comprada

De novo pode-se ver que a energia comprada para a operação anual do modelo com CHP é de maior quantidade, porém isso não significa que este tenha um maior custo operacional.

4.2 Viabilidade Econômica

Para realizar a análise da viabilidade econômica devem ser abordados os custos envolvidos na operação dos dois cenários e de instalação e manutenção do sistema de CHP. Primeiramente, são mostrados os custos para instalação da central cogeneradora. Os dados apresentados foram estabelecidos por um fabricante através de contato pessoal [Schmidt, 2013]. Foram estabelecidos um custo de instalação por potência de energia elétrica instalada e um custo de operação e manutenção (O&M) por produção de energia elétrica anual. Na tabela abaixo são mostrados esses custos:

Tabela 4.5 - Custos de instalação do CHP

Custo Instalação CHP (R\$/kW)	R\$ 2.600,00
Custo O&M Anual CHP (R\$/MWh)	R\$ 45,00
Capacidade do CHP (kW)	166
Custo Instalação CHP	R\$ 432.118,21
Energia Elétrica Prod. (MWh/ano)	77,53
Custo O&M Anual	R\$ 3.488,78

Os custos de operação dos dois modelos foram estabelecidos com os resultados da simulação com as tarifas definidas no item 3.2. Abaixo são mostrados os custos operacionais do modelo de referência e do modelo com CHP:

Tabela 4.6 - Custos de operação do modelo de referência

	Custo Energia Elétrica	Custo Demanda de Energia Elétrica	Custo Gás Natural	Impostos	Total
Jan	R\$ 12.463	R\$ 1.070	R\$ 2.549	R\$ 5.389	R\$ 21.471
Fev	R\$ 9.665	R\$ 916	R\$ 1.937	R\$ 4.198	R\$ 16.715
Mar	R\$ 12.881	R\$ 1.139	R\$ 3.564	R\$ 5.554	R\$ 23.137
Abr	R\$ 9.199	R\$ 888	R\$ 3.376	R\$ 4.031	R\$ 17.494
Mai	R\$ 8.590	R\$ 769	R\$ 4.397	R\$ 3.722	R\$ 17.478
Jun	R\$ 8.168	R\$ 729	R\$ 4.039	R\$ 3.518	R\$ 16.453
Jul	R\$ 9.424	R\$ 782	R\$ 4.954	R\$ 4.050	R\$ 19.209
Ago	R\$ 8.849	R\$ 800	R\$ 4.946	R\$ 3.832	R\$ 18.428
Set	R\$ 8.722	R\$ 919	R\$ 5.135	R\$ 3.840	R\$ 18.615
Out	R\$ 9.652	R\$ 944	R\$ 4.361	R\$ 4.235	R\$ 19.192
Nov	R\$ 11.105	R\$ 1.136	R\$ 4.277	R\$ 4.873	R\$ 21.390
Dez	R\$ 10.730	R\$ 899	R\$ 2.711	R\$ 4.624	R\$ 18.963
Total	R\$ 119.447	R\$ 10.991	R\$ 46.244	R\$ 51.864	R\$ 228.547

Tabela 4.7 - Custos de operação do modelo com CHP

	Custo Energia Elétrica	Custo Demanda de Energia Elétrica	Custo Gás Natural	Impostos	Total
Jan	R\$ 6.130	R\$ 939	R\$ 5.170	R\$ 2.618	R\$ 14.857
Fev	R\$ 5.019	R\$ 841	R\$ 3.756	R\$ 2.175	R\$ 11.790
Mar	R\$ 6.772	R\$ 1.043	R\$ 5.987	R\$ 2.895	R\$ 16.697
Abr	R\$ 4.356	R\$ 813	R\$ 5.174	R\$ 1.923	R\$ 12.265
Mai	R\$ 4.315	R\$ 684	R\$ 5.888	R\$ 1.853	R\$ 12.739
Jun	R\$ 4.397	R\$ 688	R\$ 5.292	R\$ 1.884	R\$ 12.261
Jul	R\$ 4.830	R\$ 736	R\$ 6.565	R\$ 2.061	R\$ 14.191
Ago	R\$ 4.517	R\$ 710	R\$ 6.397	R\$ 1.937	R\$ 13.562
Set	R\$ 4.357	R\$ 824	R\$ 6.694	R\$ 1.928	R\$ 13.803
Out	R\$ 4.571	R\$ 852	R\$ 6.236	R\$ 2.017	R\$ 13.676
Nov	R\$ 5.567	R\$ 1.047	R\$ 6.440	R\$ 2.461	R\$ 15.515
Dez	R\$ 5.365	R\$ 818	R\$ 4.803	R\$ 2.290	R\$ 13.276
Total	R\$ 60.195	R\$ 9.995	R\$ 68.400	R\$ 26.043	R\$ 164.633

Neste caso se confirma que a implantação do CHP traz redução de custo operacional mesmo com um maior consumo energético mostrado no capítulo anterior. O modelo com CHP obteve uma redução de custo operacional de 28 % em relação ao modelo de referência. Essa redução é proporcionada pela grande diferença no custo da energia elétrica que o sistema de CHP produz. No modelo com CHP esse custo é aproximadamente a metade em relação ao modelo de referência, porém há um acréscimo no custo do gás natural de 48 %. É importante resaltar que a carga tributária no custo da energia elétrica fica na casa dos 40 %.

Com todos os valores estabelecidos é possível montar um fluxo de caixa do investimento para análise de viabilidade econômica. O fluxo de caixa foi composto por um investimento inicial (custo de instalação) e as parcelas anuais são compostas pela diferença de custo operacional entre os dois modelos menos o custo anual de manutenção do CHP.

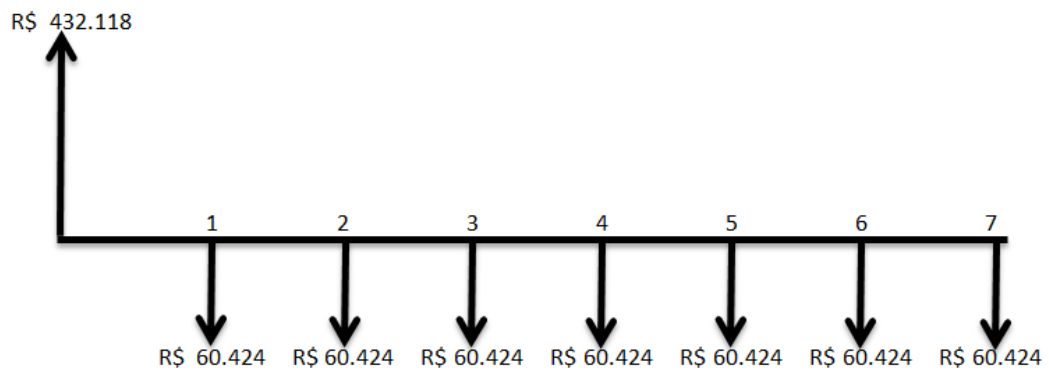


Figura 4.13 - Fluxo de caixa

A partir desse fluxo de caixa foi analisado três métodos de avaliação de viabilidade econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), e *payback*. Inicialmente para as análises de VPL e TIR foram estabelecidos períodos de 10, 15 e 20 anos e uma taxa de desconto de 7,44 % (a taxa de desconto não é necessária para cálculo da TIR). Os valores das avaliações são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 4.8 - Resultados de VPL e TIR

	10	15	20
TIR	6,61%	11,10%	11,55%
VPL	-R\$ 16.267	R\$ 103.169	R\$ 186.586

No período de 10 anos pode se ver um VPL negativo, tornando o investimento inviável. A partir do período de 15 anos o VPL é positivo e a viabilidade é possível. Para saber exatamente em quanto tempo o investimento se paga foi utilizado a análise do *payback* descontado. Para realizar esta análise foi necessário trazer cada parcela anual ao valor

presente. Utilizando a mesma taxa de desconto para os valores presentes foi realizado um segundo fluxo de caixa.

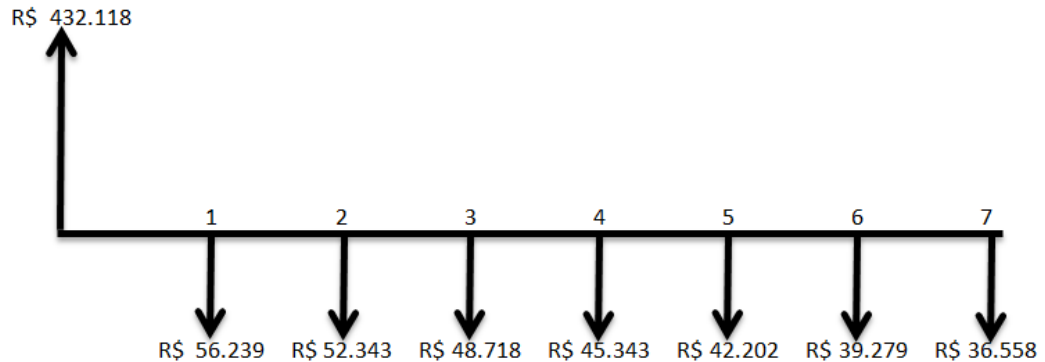


Figura 4.14 - Fluxo de caixa com parcelas trazidas ao valor presente

Com esse fluxo de caixa o *payback* descontado foi de 10,59 anos. Para o projeto ser considerado viável o tempo de retorno deve ser menor que a vida útil do equipamento. Brasil, 2005, apresentou um estudo considerando a vida útil de uma central cogeneradora de 20 anos ou mais, nesse caso 10,59 anos seria um *payback* considerado economicamente viável para esse investimento.

No entanto essa análise é apenas para uma taxa de desconto. Para mostrar esse mesmo estudo com diferentes taxas, foram recalculados os fluxos de caixa e os resultados são mostrados na tabela abaixo. O critério de escolha das taxas de desconto está descrito no item 4.3.

Tabela 4.9 - *Payback* para diferentes taxas de desconto

Taxa de Desconto	<i>Payback</i> (anos)
7,44%	10,59
9,02%	11,99
10,92%	14,66
12,82%	20,63
14,72%	-

Onde não há valor de tempo de retorno na tabela 5.9 o *payback* não existe ou pode ser considerado infinito. Esse comportamento se dá pelo fato de que o cálculo do valor presente em função do período é uma curva exponencial, por tanto dependendo das condições o valor do investimento inicial nunca será atingido. Esse comportamento pode ser visto no gráfico abaixo:

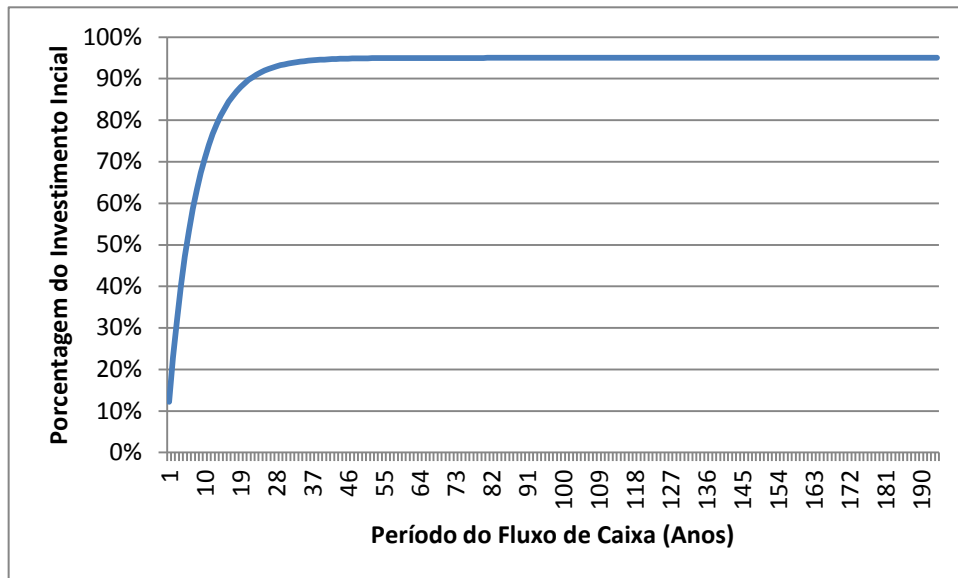


Figura 4.15 - Comportamento do investimento sem tempo de retorno (taxa de desconto de 14,72 %)

No caso do gráfico 5.15 o tempo de retorno seria exatamente onde o gráfico cruza os 100 % do investimento inicial (eixo Y). No caso observa-se que o gráfico nunca irá cruzar os 100 %, desta maneira o *payback* é inexistente ou tende ao infinito. No gráfico 5.16 é mostrada a curva para as cinco taxas de desconto estudadas.

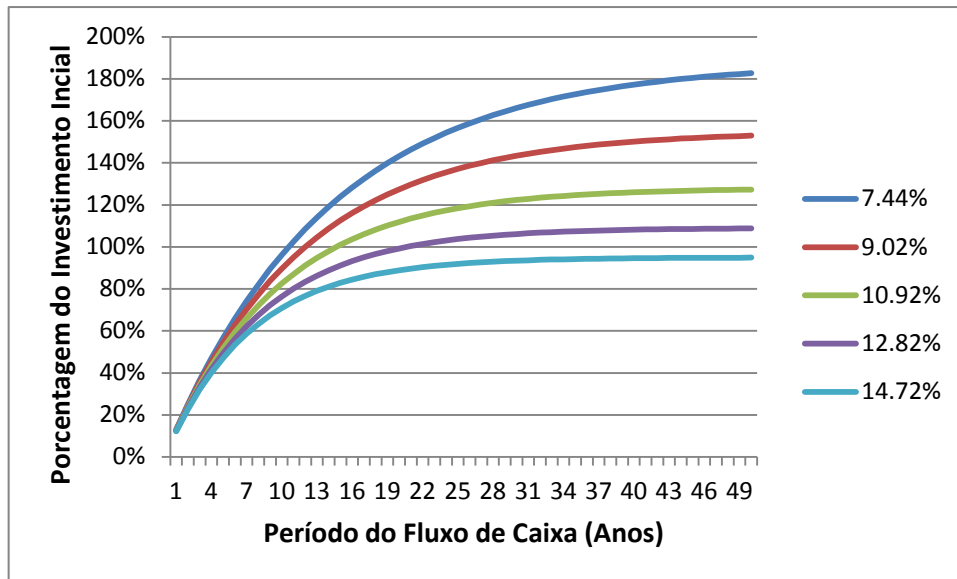


Figura 4.16 - Comportamento do investimento para as diferentes taxas de desconto estudadas

Nesta comparação entre o modelo de referência e o modelo com CHP o investimento foi considerado viável para as taxas de desconto até 10,92 %, a partir do valor de 12,82 % passa a ser inviável.

4.3 Cenários Estudados

Como o objetivo do trabalho é analisar a viabilidade econômica não apenas de um caso (estudo realizado no capítulo anterior) e sim expandir esse resultado para abranger inúmeras possibilidades dentro da construção de um hotel localizado em Porto Alegre, os modelos descritos anteriormente foram submetidos à algumas alterações para compor uma série de diferentes casos, que foram chamados de cenários. Para compor esses cenários, foram escolhidos alguns parâmetros fundamentais para a viabilidade econômica e alterados dentro de uma faixa selecionada. Como toda a análise foi baseada em resultados de simulação energética, esses parâmetros deveriam poder ser alterados dentro dos dados de entrada da simulação de uma maneira hábil para compor os cenários. Sendo assim, os parâmetros escolhidos foram:

- Área do hotel;
- Custo da energia elétrica (R\$/kWh);
- Custo do gás natural (R\$/kWh);

- Taxa de desconto, ao ano, para análise de *payback*.

As faixas em que foram variados os parâmetros foram definidas a partir de informações do mercado de energia e de dados levantados. Para a área do hotel, a faixa foi definida baseada nos dados levantados da pesquisa realizada neste trabalho. Para os custos das fontes energéticas foi estabelecida uma variação de 25 % a mais e a menos do valor apresentado da tarifa, compondo uma faixa de 50 % de variação. As taxas de desconto foram baseadas nos valores da taxa SELIC dos últimos 5 anos.

Para a taxa de desconto e para a área do hotel foram estabelecidos cinco valores. Já para os preços das fontes energéticas foram estabelecidos três valores para cada uma, conforme a tabela abaixo:

Tabela 4.10 - Faixa de variação dos parâmetros

Taxa de Desconto (a.a.)	Área Hotel (m ²)	Preço E.E. (R\$/kWh)	Preço G.N. (R\$/kWh)
7,44%	8338,32	0,285	0,085
9,02%	10798,48	0,380	0,170
10,92%	13258,64	0,475	0,255
12,82%	16948,88	-	-
14,72%	20024,08	-	-

Como é a diferença do preço da energia elétrica para o preço do gás natural que influencia a viabilidade econômica da análise, foi possível combinar esses dois parâmetros em apenas um. A combinação dos 6 valores dos dois parâmetros resultou em 9 valores desse novo parâmetro (diferença entre custo de energia elétrica e gás natural). A combinação dos 5 valores de taxa de desconto, 5 valores de área do hotel e 9 valores da diferença entre custo de energia elétrica e gás natural, resultou em 225 cenários estudados. Os 9 valores da diferença entre custo de energia elétrica e gás natural são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 4.11 - Diferença entre custo de energia elétrica e gás natural

Preço E.E. (R\$/kWh)	Preço G.N. (R\$/kWh)	Dif. EE x Comb
R\$ 0,475	R\$ 0,085	R\$ 0,390
R\$ 0,475	R\$ 0,170	R\$ 0,305
R\$ 0,380	R\$ 0,085	R\$ 0,295
R\$ 0,475	R\$ 0,255	R\$ 0,220
R\$ 0,380	R\$ 0,170	R\$ 0,210
R\$ 0,285	R\$ 0,085	R\$ 0,200
R\$ 0,380	R\$ 0,255	R\$ 0,125
R\$ 0,285	R\$ 0,170	R\$ 0,115
R\$ 0,285	R\$ 0,255	R\$ 0,030

Para cada um dos 225 cenários foi realizada uma análise de viabilidade econômica utilizando o método do *payback*. Nas tabelas 5.10 e 5.11 as células amarelas mostram os parâmetros utilizados no cenário de referência (utilizado para a comparação energética e viabilidade econômica, mostrados anteriormente).

4.4 Ajuste de Curva para Representar os Resultados dos Diferentes Cenários

Após realizadas as análises de viabilidade econômica para os 225 cenários o objetivo foi mostrar como as mesmas se comportam mediante às variações dos parâmetros. Assim pôde-se mostrar a sensibilidade dos resultados para cada variável envolvida na análise. Conforme os parâmetros definidos no capítulo anterior, inicialmente foram estabelecidas as variáveis independentes e dependentes do problema, assumindo como variável independente a taxa de desconto, a área do hotel e a diferença de custo das fontes energéticas, e como variável dependente o *payback* descontado. A partir dessas variáveis tentou-se ajustar uma equação para descrever o comportamento geral do problema. Porém viu-se que, neste caso, com uma equação com três variáveis independentes e uma dependente, o ajuste não conseguiu se aproximar do comportamento real do problema. O valor de R^2 para o primeiro ajuste foi de 0,784.

Como o *software* utilizado para esse ajuste não possui nenhum modelo sugerido para ajuste da equação com três variáveis independentes, foi utilizado um modelo sugerido por Engineering Reference, 2013, chamado de equação triquadrática. Essa equação é um polinômio de grau dois com 27 termos, todos multiplicados por coeficientes (a_0 até a_{26}). Os

valores dos coeficientes obtidos no ajuste e as variáveis multiplicadas em cada termo são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 4.12 - Valores do primeiro ajuste de equação

Coef.	Valor	Variável
a0	84526	cte.
a1	10843672	x^2
a2	-1927198	x
a3	0	y^2
a4	-16	y
a5	1334729	z^2
a6	-709191	z
a7	0	x^2y^2
a8	358	xy
a9	0	xy^2
a10	-2024	x^2y
a11	171972836	x^2z^2
a12	16190675	xz
a13	-30493706	xz^2
a14	-91231317	x^2z
a15	0	y^2z^2
a16	132	yz
a17	-248	yz^2
a18	0	y^2z
a19	1	$x^2y^2z^2$
a20	-1	x^2y^2z
a21	-32104	x^2yz^2
a22	0	xy^2z^2
a23	17032	x^2yz
a24	0	xy^2z
a25	5671	xyz^2
a26	-3011	xyz

Neste ajuste a variável x foi considerada a taxa de desconto, y a área do hotel e z a diferença de custo das fontes energéticas.

Como o ajuste não conseguiu representar de uma maneira precisa o comportamento do estudo, a solução encontrada foi remover uma das variáveis independentes da equação. Assim foi realizado um ajuste em níveis onde cada nível é uma equação para cada valor estabelecido da antiga variável. Para selecionar a variável a ser removida da equação foi analisada a

sensibilidade de cada uma em relação à variável dependente. Nos gráficos abaixo pode-se ver a sensibilidade de cada uma das três variáveis:

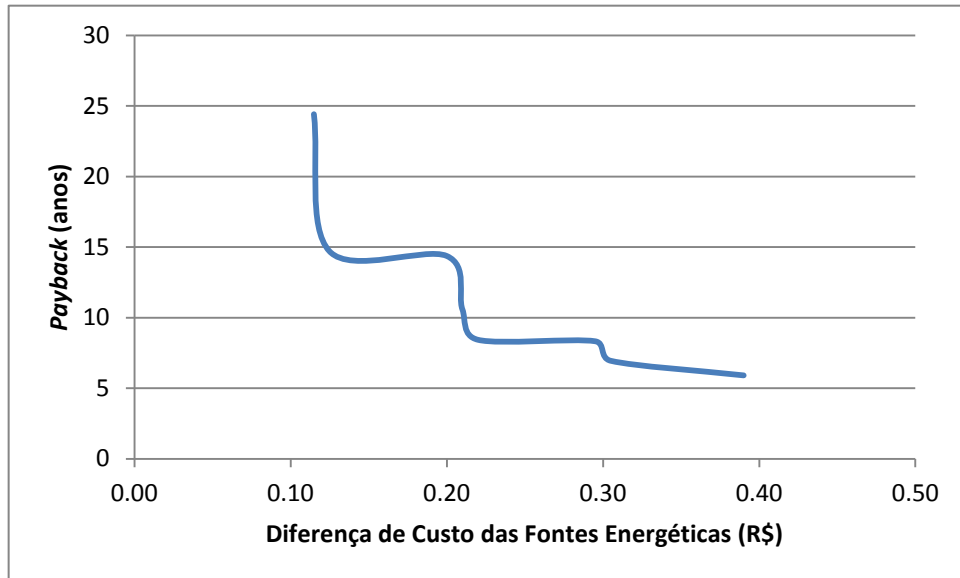


Figura 4.17 - Sensibilidade da diferença de custo das fontes energéticas

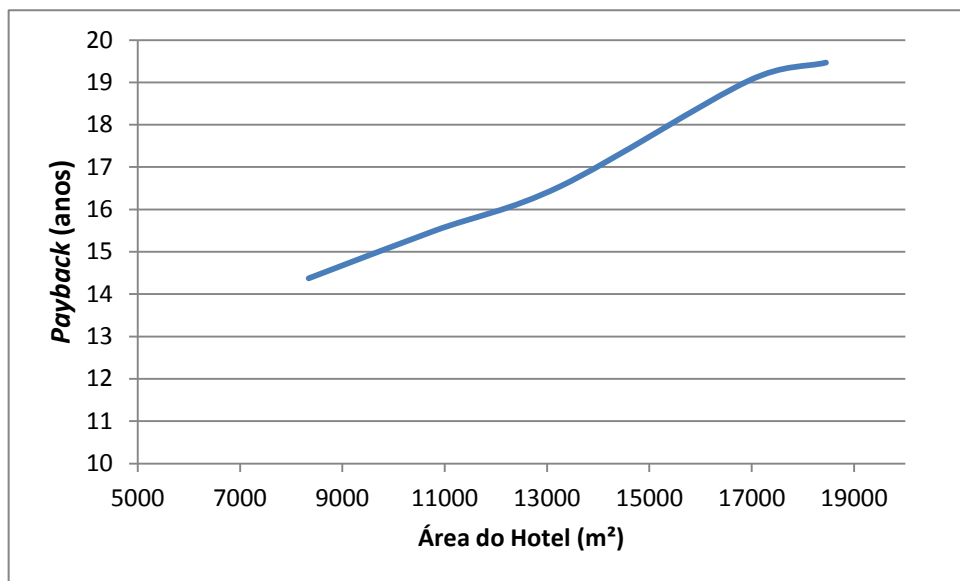


Figura 4.18 - Sensibilidade da área do hotel

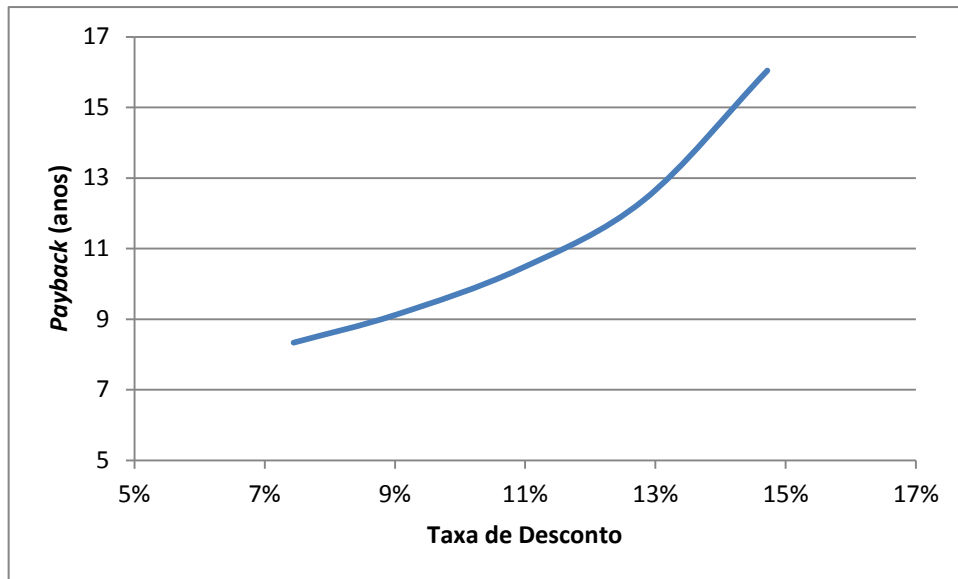


Figura 4.19 - Sensibilidade da taxa de desconto

Como a taxa de desconto apresentou uma sensibilidade mais comportada, permitindo portanto, ajustes de equações com valores de R^2 igual a 1 para uma precisa interpolação de dados, se necessária, a mesma foi escolhida para ser removida da equação. Assim o ajuste das equações em níveis foi realizado para cada um dos 5 valores de taxa de desconto estabelecidos no capítulo anterior.

Antes de realizar o ajuste para cada uma das 5 taxas de desconto, foi visto que em alguns casos o valor do tempo de retorno do investimento tende ao infinito (explicado no final do item 4.2). Porém, para realizar o ajuste é necessário destinar algum valor real nesses casos. Então, para se achar os valores de *payback* nesses casos em que o valor tende ao infinito, foi realizada uma interpolação dos dados. Essas interpolações foram realizadas através de uma regressão polinomial e todas obtiveram R^2 igual a um.

Após realizadas as interpolações, pode-se apresentar os dados para as 5 taxas de desconto de uma forma gráfica para melhor visualização do seu comportamento. Abaixo, são mostrados os gráficos dos 5 níveis avaliados:

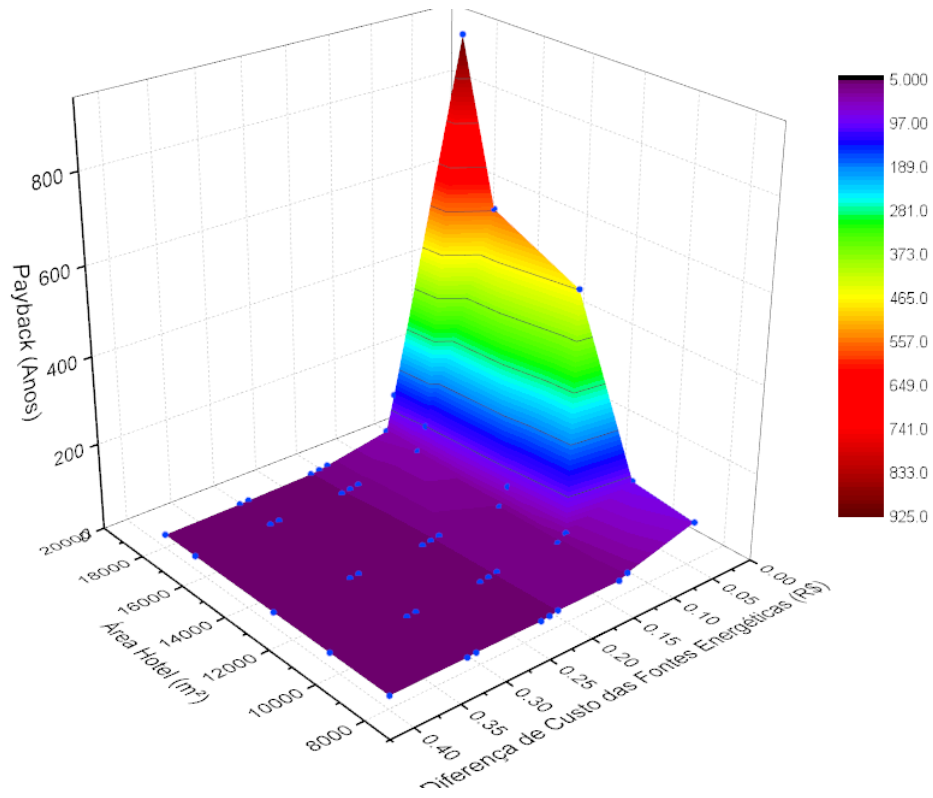


Figura 4.20 - Dados com taxa de desconto de 7,44 %

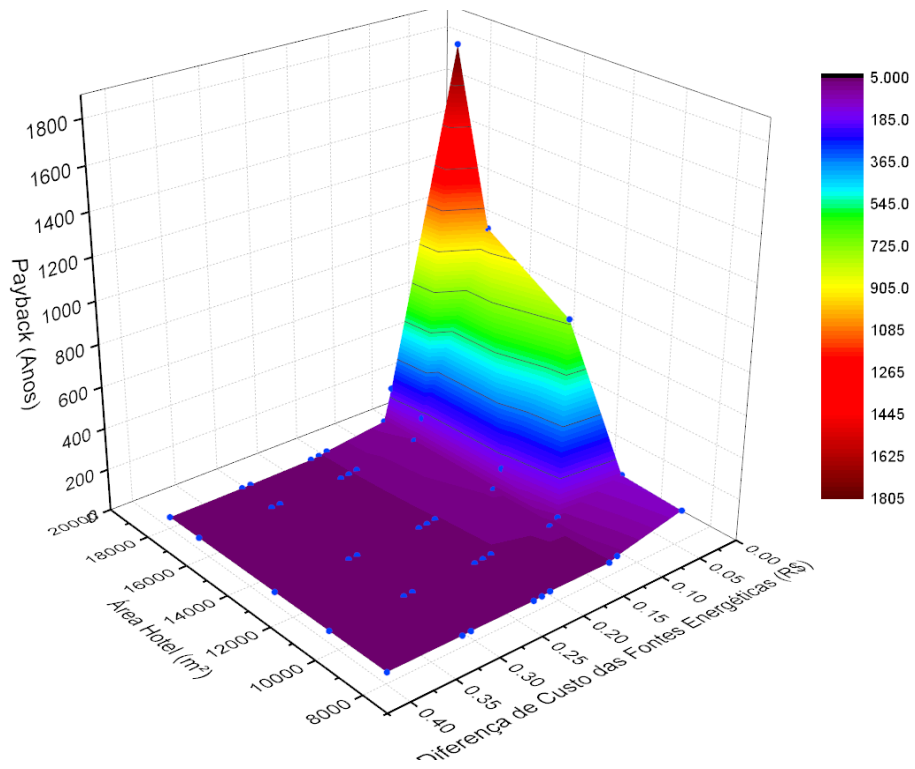


Figura 4.21 - Dados com taxa de desconto de 9,02 %

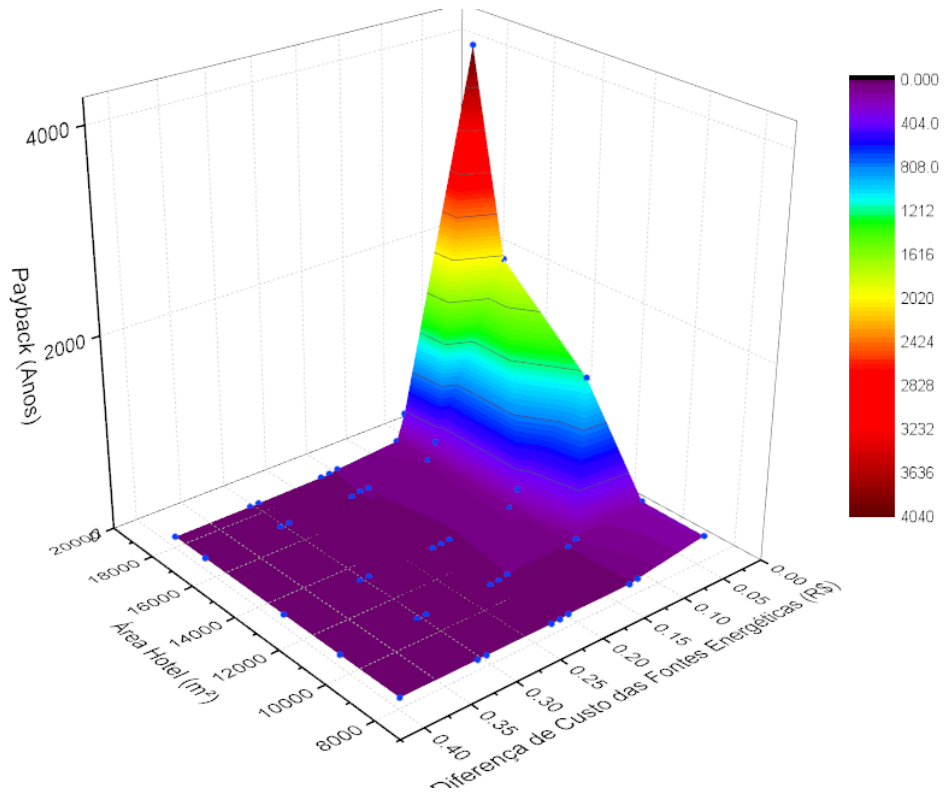


Figura 4.22 - Dados com taxa de desconto de 10,92 %

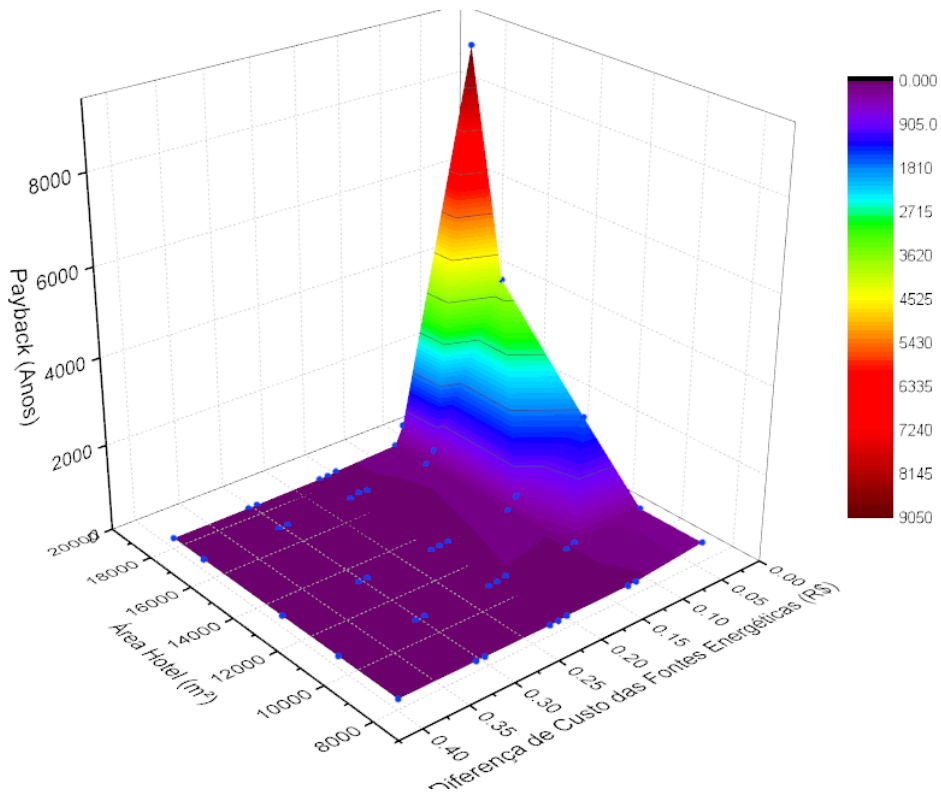


Figura 4.23 - Dados com taxa de desconto de 12,82 %

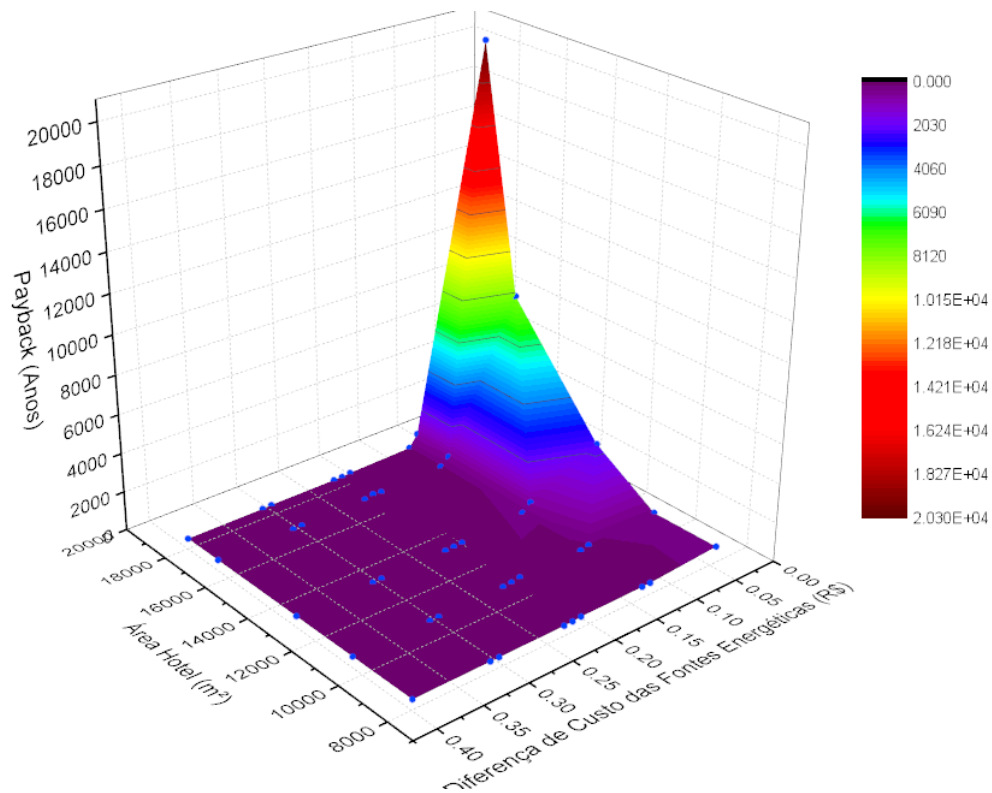


Figura 4.24 - Dados com taxa de desconto de 14,72 %

Pode-se ver que o comportamento nos 5 níveis é muito parecido. A diferença ocorre na escala do eixo z (*payback*), onde quanto maior a taxa de desconto maior o tempo de retorno do investimento. Porém os pontos no canto direito superior do gráfico apresentam valores de *payback* muito acima do que seria considerado economicamente viável e percebe-se também que há uma inflexão a partir da diferença de custo das fontes energéticas com valores entre R\$ 0,15 e R\$ 0,10. Por tanto, para possibilitar uma melhor análise do gráfico onde aparecem os valores economicamente viáveis, foram retirados os dados com a diferença de custo das fontes energéticas menores que R\$ 0,125. Abaixo, é mostrado o gráfico com esses dados para a taxa de desconto de 7,44 %:

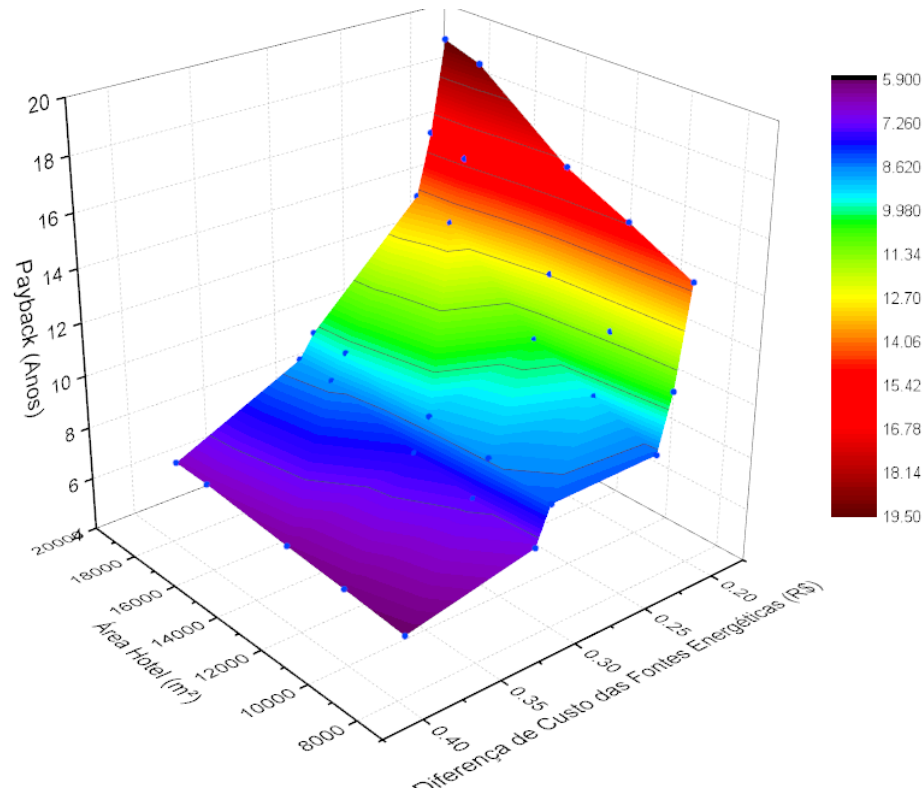


Figura 4.25 - Dados com taxa de desconto de 7,44 % para valores de diferença de custo das fontes energéticas acima de R\$ 0,125

Com o gráfico mostrado na figura 5.25 pode-se entender como se dão as influências das variáveis independentes no *payback*. A conclusão mais lógica está na diferença de custos das fontes energéticas, que quanto menor essa diferença maior é o tempo de retorno do investimento. Quanto a relação entre a área do hotel e o *payback* nota-se que esta apresenta um comportamento diretamente proporcional. Esse fato se dá pois aumentando a área do hotel sua demanda de energia elétrica também aumenta, assim a capacidade e o custo de instalação da unidade de CHP também aumentam. Já a redução de custo operacional entre o hotel com e sem a cogeração também é maior, porém não proporcionalmente ao aumento do custo inicial (Custo de instalação do CHP) fazendo com que tenham maiores tempos de retorno do investimento.

Com esses dados, foram realizados os ajustes das 5 equações que descrevem seu comportamento. A equação que melhor descreveu os dados foi uma equação de razão que tem o seguinte formato:

$$y = \frac{(a_1 + a_2x_1 + a_3x_2)}{(1 + a_4x_1 + a_5x_2)} \quad (4.1)$$

onde: a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 são os coeficientes constantes da equação, x_1 é a área do hotel, [m²], x_2 é a diferença de custo das fontes energéticas, [R\$] e y é o tempo de retorno do investimento [anos].

O ajuste dos coeficientes da equação 5.1 foi realizado através de uma regressão não linear e os resultados para os 5 níveis são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 4.13 - Resultados dos ajustes

	Níveis				
	7,44	9,02	10,92	12,82	14,72
a1	-2,92E+07	-1,09E+02	-1,08E+02	-6,51E+02	-9,32E+03
a2	5,39E+03	4,48E-02	5,29E-02	1,37E-01	1,27E+00
a3	-7,02E+07	-1,31E+03	-1,73E+03	-3,00E+03	-1,20E+04
a4	-9,56E+00	-1,08E-04	-9,63E-05	-1,27E-04	-5,41E-04
a5	8,44E+06	4,57E+01	3,27E+01	5,16E+01	3,22E+02
R ²	0,959	0,967	0,983	0,994	0,998

A equação 5.1 deve ser utilizada dentro dos limites definidos pelo ajuste. Esses limites compreendem os valores máximos e mínimos das variáveis independentes que foram avaliadas. Para a variável x_1 , sendo a área do hotel, [m²], o limite inferior é de 8338,32 e o limite superior é de 20024,08. Já para a variável x_2 , sendo a diferença de custo entre energia elétrica e o gás natural, [R\$], o limite inferior é de 0,03 e o limite superior é de 0,39.

5 CONCLUSÃO

Os resultados do trabalho mostraram que em muitos cenários a viabilidade econômica da implantação da cogeração pode ser muito boa, tendo um tempo de retorno do investimento abaixo de 6 anos. Porém, em alguns cenários foi visto que não é viável este tipo de solução. Essas constatações levam a conclusão de que é muito importante uma boa análise na hora de se tomar a decisão da utilização do sistema com CHP para melhor opção de investimento. A simulação energética é uma ferramenta que agrega um nível de qualidade muito grande para estas análises, principalmente quando se está estudando as demandas energéticas de um prédio não construído. O resultado deste trabalho pode ajudar em algum estudo inicial, contudo não substitui completamente a simulação na hora de fazer a análise completa de implantação do sistema.

Foi visto que o fator que teve grande influência na viabilidade econômica foi a diferença de custo da energia elétrica e do gás natural. Naturalmente, quanto maior essa diferença (contanto que a energia elétrica tenha o maior custo) menor é o tempo de retorno do investimento. Isso se dá pelo fato de que o motor do sistema de CHP queima gás natural para produzir energia e o prédio deixa de demandar energia elétrica da concessionária no momento em que o gerador está funcionando. Assim, a energia para alimentar o prédio é proveniente do gás, e se este for mais barato em relação à energia elétrica, o custo de operação do prédio com CHP será menor que o custo de operação do prédio sem o CHP.

Embora essa diferença entre o custo da energia elétrica e do gás natural tenha sido observada, percebe-se porém que a mesma não é muito significativa em se tratando de tarifas disponíveis no mercado brasileiro. No entanto há concessionárias de gás natural que possuem programas de incentivo, os quais envolvem subsídios para o preço do gás quando se faz uso da cogeração [www.comgás.com.br, acessado em 27/03/2014]. Nesses casos, a tarifa do gás chega a ser metade do seu valor original, possibilitando alta indicação de uma boa viabilidade econômica da implantação do sistema CHP.

Uma questão que é importante ser debatida quando se está estudando a implantação da cogeração em prédios dentro de centros urbanos é a questão das emissões de gases. Em relação a questões financeiras foi visto que podem haver cenários muito atrativos, porém o que deve ser debatido é a emissão dos gases oriundos da queima do combustível. Com ou sem a cogeração a emissão para a atmosfera é muito parecida, pois a produção de energia elétrica

também implica na emissão desses gases. No entanto, quando se instala um motor para cogeração, este estará emitindo os gases dentro do centro urbano, enquanto as usinas que produzem energia elétrica normalmente estão afastadas das grandes cidades. Isso faz com que aumente o nível de poluição dentro da cidade e ajuda a reduzir a qualidade do ar que seus moradores respiram. Levando em consideração este fato, é muito importante que seja avaliado a instalação de um sistema eficiente de tratamento de gases acoplado ao CHP quando se está estudando implantar esse tipo de solução.

Como citado no item 1.1, o objetivo secundário deste trabalho era utilizar e entender o funcionamento do modelo de cogeração dentro do *software* de simulação termo-energética. Esse modelo foi muito bem explorado quando se tratava das entradas de dados para a simulação. Foi simulado o funcionamento de um equipamento real, ajustando as equações de desempenho do motor. Também foi constatado que a ferramenta da simulação possibilita uma profunda análise de funcionamento do sistema aliado com as demandas do prédio, como pode ser visto no item 4.1 onde se analisou a temperatura da água do tanque de armazenamento.

Como conclusão geral do trabalho pode-se dizer que este tipo de estudo tem alto valor para se conhecer as novas e já disponíveis tecnologias e soluções de engenharia. Este trabalho deve servir como incentivo para os tomadores de decisão na construção de edificações irem em busca de soluções que tornem seus empreendimentos de alta performance e qualidade e que as busquem na engenharia de ponta.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A ideia deste trabalho foi mostrar a viabilidade econômica da cogeração em diversos cenários propostos. Porém esses cenários se restringem a algumas definições como o tipo de operação da unidade cogeneradora, à tarifa de energia elétrica, ao tipo de edificação, e apenas a empreendimentos localizados em Porto Alegre. Futuros trabalhos devem expandir essas restrições conforme haja necessidade.

Um fator que é muito importante ser investigado é o tipo de operação do CHP. Neste trabalho o sistema operava atendendo a demanda de energia elétrica apenas em horário de ponta. Porém há uma série de variantes que podem ser estudadas. Por exemplo, a operação em carga constante do motogerador, onde o excedente de energia produzida seja adicionada a rede de energia elétrica em um conceito chamado de *net metering* que a ANEEL já regulamentou e as concessionárias de energia elétrica por sua vez já estão colocando em vigor em projetos que possuem microgeração.

Outra sugestão de trabalho seria o estudo mais aprofundado do modelo de cogeração com a simulação. Pode-se estudar mais afundo o comportamento alterando algumas variáveis como temperaturas estabelecidas, vazões de água e eficiências dos sistemas. Assim pode-se entender melhor como se dá o funcionamento ótimo do motor para uma determinada demanda de energia elétrica e térmica do prédio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, M. I. A. S. P., **Simulação Higrotérmica de Edificações - Aplicação do EMPD no Cálculo da Umidade Interior**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2011.

ANEEL, **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**, 2008, www.aneel.gov.br, acessado em 08/2012.

ASHRAE, **90.1-2010 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, EUA, 2010.

ASHRAE, **Handbook of Applications, HOA**, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, EUA, 2007.

ASHRAE, **Handbook of Fundamentals, HOF**, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, EUA, 2009.

ASHRAE, **Handbook of System and Equipment, HSE**, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, EUA, 2008.

Barja, G. J. A., **A Cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico**, 2006, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2006.

BEMTUR, **Boletim Estatístico Municipal do Turismo em Porto Alegre**, Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2012

Bohdanowicz, P.; Churie-Kallhauge, A.; Martinac, I., **Energy-Efficiency and Conservation in Hotels - Towards Sustainable Tourism**, 2001, 4th International Symposium on Asia Pacific Architecture, Havaí, 2001.

Brasil, N. P., **Apostila de Cogeração**, 2005, www.professores.uff.br, acessado em 10/2012.

Carlo, J. C., **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações não Residenciais**, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

CIBSE, **Environmental Design Guide A**, The Chartered Institution of Building Services Engineers London, 2006

Dorer, V., Weber, A., **Energy and CO₂ Emissions Performance Assessment of Residential Micro-Cogeneration Systems with Dynamic Whole-Building Simulation Programs**, Elsevier Energy Conversion and Management, 2009.

EnergyPlus, **Engineering Reference: The Reference for EnergyPlus Calculations**, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, acessado em 12/2013.

EnergyPlus, **Input Output Reference**, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, acessado em 12/2013.

Hendron, R., Anderson, R., Christensen, C., Eastment, M., and Reeves, P., **Development of an Energy Savings Benchmark for All Residential End-Uses**, Proceedings of SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference, Boulder, CO, August 4 - 6, 2004.

Hotelnews, **Hotelaria em Números Indica Crescimento em Ocupação e Receita**, 2012, www.revistahotelnews.com.br/2009/noticia.php?req_url=006&id_noticia=1386, acessado em 02/2014.

Hyams, D. G., **CurveExpert Professional Documentation**, 2014, www.curveexpert.net, acessado em 02/2014

Midwest CHP Application Center, **Combined Heat and Power (CHP) Resource Guide**, 2005, www.energy.gov, acessado 10/2012.

Pozza, F., **Análise Térmica e Energética de uma Edificação Residencial Climatizada com Sistema de Fluxo de Refrigerante Variável - VRF**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Priyadarsini, R., Xuchao, W., Eang, L. S., **A Study of Energy Performance of Hotel Buildings in Singapore**, Elsevier Energy and Buildings, 2009

Rio+20, **Conferencia das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável**, 2012, www.rio20.info, acessado em 10/2013.

Roque, W. L., **Cálculo Numérico**, Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013

Schmidt, C. E, contato pessoal em 08/2013

Secretaria Municipal do Turismo de Porto Alegre, **BEMTUR - Boletim Estatístico Municipal do Turismo em Porto Alegre**, 2012, www.portoalegre.rs.gov.br, acessado em 10/2012.

Smith, A. D., Mago, P. J., Fumo, N., **Benefits of Thermal Energy Storage Option Combined with CHP System for Different Commercial Building Types**, Elsevier Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2013.

Soares, F. R. S., **Análise Econômica do Gás Natural**, Apostila do Curso de Especialização em Utilização do Gás Natural, UFRGS, 2013

Staffell, I., **The Energy and Fuel Data Sheet**, University of Birmingham, UK, 2011

USGBC, **Leadership in Energy and Environmental Design**, 2009, www.usgbc.org, acessado em 10/2013.

Waukesha, **VGF18GL/GLD**, 2010, www.dresser.com/waukesha, acessado em 05/2013.

APÊNDICE A

Como descrito no item 4.3 houveram 225 cenários estudados variando os parâmetros envolvidos na análise de viabilidade econômica da implantação do sistema de CHP. Na tabela abaixo são mostrados os resultados de retorno de investimento e os parâmetros de todos esses cenários:

Tabela A.1 - Resultados dos Cenários Estudados

Cenário	Tempo Payback (Anos)	Taxa de Desconto (a.a.)	Área Hotel (m²)	Dif. E.E. x G.N. (R\$)
1	14,37	7,44%	8338,32	0,200
2	24,42	7,44%	8338,32	0,115
3	69,48	7,44%	8338,32	0,030
4	8,33	7,44%	8338,32	0,295
5	10,59	7,44%	8338,32	0,210
6	14,70	7,44%	8338,32	0,125
7	5,91	7,44%	8338,32	0,390
8	6,94	7,44%	8338,32	0,305
9	8,43	7,44%	8338,32	0,220
10	15,50	7,44%	10798,48	0,200
11	33,37	7,44%	10798,48	0,115
12	87,17	7,44%	10798,48	0,030
13	8,71	7,44%	10798,48	0,295
14	11,68	7,44%	10798,48	0,210
15	18,16	7,44%	10798,48	0,125
16	6,12	7,44%	10798,48	0,390
17	7,41	7,44%	10798,48	0,305
18	9,42	7,44%	10798,48	0,220
19	16,55	7,44%	13258,64	0,200
20	64,25	7,44%	13258,64	0,115
21	466,54	7,44%	13258,64	0,030
22	9,03	7,44%	13258,64	0,295
23	12,75	7,44%	13258,64	0,210
24	22,92	7,44%	13258,64	0,125
25	6,29	7,44%	13258,64	0,390
26	7,83	7,44%	13258,64	0,305
27	10,44	7,44%	13258,64	0,220
28	19,04	7,44%	16948,88	0,200
29	97,19	7,44%	16948,88	0,115
30	561,23	7,44%	16948,88	0,030

31	9,69	7,44%	16948,88	0,295
32	15,66	7,44%	16948,88	0,210
33	41,88	7,44%	16948,88	0,125
34	6,61	7,44%	16948,88	0,390
35	8,80	7,44%	16948,88	0,305
36	13,37	7,44%	16948,88	0,220
37	19,47	7,44%	18451,20	0,200
38	130,45	7,44%	18451,20	0,115
39	923,79	7,44%	18451,20	0,030
40	9,80	7,44%	18451,20	0,295
41	16,11	7,44%	18451,20	0,210
42	47,06	7,44%	18451,20	0,125
43	6,66	7,44%	18451,20	0,390
44	8,94	7,44%	18451,20	0,305
45	13,82	7,44%	18451,20	0,220
46	17,53	9,02%	8338,32	0,200
47	33,16	9,02%	8338,32	0,115
48	107,32	9,02%	8338,32	0,030
49	9,13	9,02%	8338,32	0,295
50	11,99	9,02%	8338,32	0,210
51	18,07	9,02%	8338,32	0,125
52	6,30	9,02%	8338,32	0,390
53	7,49	9,02%	8338,32	0,305
54	9,26	9,02%	8338,32	0,220
55	19,44	9,02%	10798,48	0,200
56	51,48	9,02%	10798,48	0,115
57	121,89	9,02%	10798,48	0,030
58	9,60	9,02%	10798,48	0,295
59	13,48	9,02%	10798,48	0,210
60	24,83	9,02%	10798,48	0,125
61	6,53	9,02%	10798,48	0,390
62	8,02	9,02%	10798,48	0,305
63	10,49	9,02%	10798,48	0,220
64	21,39	9,02%	13258,64	0,200
65	133,09	9,02%	13258,64	0,115
66	743,09	9,02%	13258,64	0,030
67	9,99	9,02%	13258,64	0,295
68	15,01	9,02%	13258,64	0,210
69	44,22	9,02%	13258,64	0,125
70	6,72	9,02%	13258,64	0,390
71	8,53	9,02%	13258,64	0,305
72	11,80	9,02%	13258,64	0,220
73	27,02	9,02%	16948,88	0,200
74	159,35	9,02%	16948,88	0,115
75	995,64	9,02%	16948,88	0,030

76	10,82	9,02%	16948,88	0,295
77	19,74	9,02%	16948,88	0,210
78	58,30	9,02%	16948,88	0,125
79	7,08	9,02%	16948,88	0,390
80	9,71	9,02%	16948,88	0,305
81	15,95	9,02%	16948,88	0,220
82	28,17	9,02%	18451,20	0,200
83	223,83	9,02%	18451,20	0,115
84	1801,51	9,02%	18451,20	0,030
85	10,96	9,02%	18451,20	0,295
86	20,57	9,02%	18451,20	0,210
87	67,11	9,02%	18451,20	0,125
88	7,15	9,02%	18451,20	0,390
89	9,89	9,02%	18451,20	0,305
90	16,66	9,02%	18451,20	0,220
91	27,82	10,92%	8338,32	0,200
92	47,40	10,92%	8338,32	0,115
93	167,05	10,92%	8338,32	0,030
94	10,42	10,92%	8338,32	0,295
95	14,66	10,92%	8338,32	0,210
96	30,20	10,92%	8338,32	0,125
97	6,84	10,92%	8338,32	0,390
98	8,29	10,92%	8338,32	0,305
99	10,59	10,92%	8338,32	0,220
100	40,24	10,92%	10798,48	0,200
101	82,30	10,92%	10798,48	0,115
102	173,43	10,92%	10798,48	0,030
103	11,04	10,92%	10798,48	0,295
104	17,24	10,92%	10798,48	0,210
105	37,46	10,92%	10798,48	0,125
106	7,11	10,92%	10798,48	0,390
107	8,96	10,92%	10798,48	0,305
108	12,32	10,92%	10798,48	0,220
109	30,15	10,92%	13258,64	0,200
110	257,19	10,92%	13258,64	0,115
111	1164,65	10,92%	13258,64	0,030
112	11,62	10,92%	13258,64	0,295
113	20,43	10,92%	13258,64	0,210
114	91,17	10,92%	13258,64	0,125
115	7,35	10,92%	13258,64	0,390
116	9,62	10,92%	13258,64	0,305
117	14,33	10,92%	13258,64	0,220
118	42,54	10,92%	16948,88	0,200
119	258,78	10,92%	16948,88	0,115
120	1986,61	10,92%	16948,88	0,030

121	12,82	10,92%	16948,88	0,295
122	44,77	10,92%	16948,88	0,210
123	83,62	10,92%	16948,88	0,125
124	7,79	10,92%	16948,88	0,390
125	11,22	10,92%	16948,88	0,305
126	22,73	10,92%	16948,88	0,220
127	45,27	10,92%	18451,20	0,200
128	374,38	10,92%	18451,20	0,115
129	4029,55	10,92%	18451,20	0,030
130	13,03	10,92%	18451,20	0,295
131	28,56	10,92%	18451,20	0,210
132	98,24	10,92%	18451,20	0,125
133	7,87	10,92%	18451,20	0,390
134	11,47	10,92%	18451,20	0,305
135	24,77	10,92%	18451,20	0,220
136	45,20	12,82%	8338,32	0,200
137	65,72	12,82%	8338,32	0,115
138	242,32	12,82%	8338,32	0,030
139	12,37	12,82%	8338,32	0,295
140	20,63	12,82%	8338,32	0,210
141	51,17	12,82%	8338,32	0,125
142	7,52	12,82%	8338,32	0,390
143	9,36	12,82%	8338,32	0,305
144	12,63	12,82%	8338,32	0,220
145	78,56	12,82%	10798,48	0,200
146	123,01	12,82%	10798,48	0,115
147	235,58	12,82%	10798,48	0,030
148	13,36	12,82%	10798,48	0,295
149	31,34	12,82%	10798,48	0,210
150	55,12	12,82%	10798,48	0,125
151	7,85	12,82%	10798,48	0,390
152	10,28	12,82%	10798,48	0,305
153	15,54	12,82%	10798,48	0,220
154	42,12	12,82%	13258,64	0,200
155	426,39	12,82%	13258,64	0,115
156	1682,91	12,82%	13258,64	0,030
157	14,29	12,82%	13258,64	0,295
158	28,80	12,82%	13258,64	0,210
159	161,43	12,82%	13258,64	0,125
160	8,14	12,82%	13258,64	0,390
161	11,19	12,82%	13258,64	0,305
162	19,78	12,82%	13258,64	0,220
163	64,51	12,82%	16948,88	0,200
164	385,04	12,82%	16948,88	0,115
165	3968,22	12,82%	16948,88	0,030

166	16,49	12,82%	16948,88	0,295
167	91,78	12,82%	16948,88	0,210
168	114,98	12,82%	16948,88	0,125
169	8,71	12,82%	16948,88	0,390
170	13,63	12,82%	16948,88	0,305
171	33,56	12,82%	16948,88	0,220
172	69,63	12,82%	18451,20	0,200
173	566,54	12,82%	18451,20	0,115
174	9025,83	12,82%	18451,20	0,030
175	16,90	12,82%	18451,20	0,295
176	39,42	12,82%	18451,20	0,210
177	136,98	12,82%	18451,20	0,125
178	8,82	12,82%	18451,20	0,390
179	14,04	12,82%	18451,20	0,305
180	38,01	12,82%	18451,20	0,220
181	69,66	14,72%	8338,32	0,200
182	88,12	14,72%	8338,32	0,115
183	333,12	14,72%	8338,32	0,030
184	16,04	14,72%	8338,32	0,295
185	29,89	14,72%	8338,32	0,210
186	80,96	14,72%	8338,32	0,125
187	8,40	14,72%	8338,32	0,390
188	10,91	14,72%	8338,32	0,305
189	16,61	14,72%	8338,32	0,220
190	134,42	14,72%	10798,48	0,200
191	173,61	14,72%	10798,48	0,115
192	308,34	14,72%	10798,48	0,030
193	18,29	14,72%	10798,48	0,295
194	55,77	14,72%	10798,48	0,210
195	77,80	14,72%	10798,48	0,125
196	8,84	14,72%	10798,48	0,390
197	12,32	14,72%	10798,48	0,305
198	25,97	14,72%	10798,48	0,220
199	57,29	14,72%	13258,64	0,200
200	640,70	14,72%	13258,64	0,115
201	2297,85	14,72%	13258,64	0,030
202	20,87	14,72%	13258,64	0,295
203	40,12	14,72%	13258,64	0,210
204	254,99	14,72%	13258,64	0,125
205	9,22	14,72%	13258,64	0,390
206	13,83	14,72%	13258,64	0,305
207	28,14	14,72%	13258,64	0,220
208	92,93	14,72%	16948,88	0,200
209	538,14	14,72%	16948,88	0,115
210	7932,68	14,72%	16948,88	0,030

211	34,16	14,72%	16948,88	0,295
212	160,77	14,72%	16948,88	0,210
213	152,41	14,72%	16948,88	0,125
214	9,99	14,72%	16948,88	0,390
215	18,97	14,72%	16948,88	0,305
216	48,41	14,72%	16948,88	0,220
217	101,23	14,72%	18451,20	0,200
218	800,31	14,72%	18451,20	0,115
219	20237,65	14,72%	18451,20	0,030
220	48,07	14,72%	18451,20	0,295
221	53,15	14,72%	18451,20	0,210
222	183,34	14,72%	18451,20	0,125
223	10,14	14,72%	18451,20	0,390
224	20,14	14,72%	18451,20	0,305
225	56,39	14,72%	18451,20	0,220

APÊNDICE B

A partir da equação 4.1 e dos coeficientes mostrados na tabela 5.13, foi realizado um teste dos seus resultados. Nesse teste foram considerados os cenários dos hotéis avaliados na pesquisa descrita no capítulo 3. Foram levados em consideração suas áreas e as tarifas pagas de energia elétrica e do combustível utilizado para aquecimento de água. Na tabela abaixo são mostrados os resultados da aplicação da equação para as cinco taxas de desconto estudadas:

Tabela B.1 - Resultados do Teste da Equação 5.1

	Área, m ² (x_1)	Dif. Cust. Font. Energ., R\$ (x_2)	<i>Payback</i> 7,44%	<i>Payback</i> 9,02%	<i>Payback</i> 10,92%	<i>Payback</i> 12,82%	<i>Payback</i> 14,72%
Hotel 02	32000	0,095	277	638	1399	1908	2129
Hotel 03	11187	0,148	18	30	48	61	73
Hotel 04	13524	0,252	13	15	22	37	65
Hotel 06	30000	0,061	558	2046	12329	9740	6279
Hotel 08	13000	0,090	54	95	157	216	265

Como citado no capítulo 5, algumas concessionárias de gás natural possuem programas para subsidiar o seu custo em instalações com cogeração, esses subsídios podem chegar a metade do preço do insumo. Na tabela abaixo foi feita a mesma análise da tabela B.1 porém com o preço do gás natural descontado de 50 % do seu valor.

Tabela B.2 - Resultados do Teste da Equação 5.1 com Preço do Gás Subsidiado

	Área, m ² (x_1)	Dif. Cust. Font. Energ., R\$ (x_2)	<i>Payback</i> 7,44%	<i>Payback</i> 9,02%	<i>Payback</i> 10,92%	<i>Payback</i> 12,82%	<i>Payback</i> 14,72%
Hotel 02	32000	0,182	106	186	330	508	692
Hotel 03	11187	0,250	7	6	6	11	25
Hotel 04	13524	0,344	7	3	1	10	36
Hotel 06	30000	0,165	110	193	341	524	709
Hotel 08	13000	0,200	17	24	37	55	82