



Bruno Gerhard Ferreira Vellinha

Cogeração aplicada a um edifício comercial

Trabalho de Conclusão de Curso

Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Graduação em Engenharia Mecânica

José Alberto dos Reis Parise

Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de agosto, 2018

You don't have to be great to start,
but you have to start to be great. – Zig Zagler

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo bem maior, a vida.

Aos meus pais, agradeço pelo apoio, carinho e amor durante toda a minha vida e, principalmente, ao longo da graduação, sendo os principais responsáveis pela minha chegada até a conclusão do curso. Ao permitirem realizar um sonho, quando saí de minha cidade, não imaginavam que hoje estariam vivenciando este momento.

À minha irmã, pelos cuidados, carinhos, conselhos e conversas. Agora com mais motivos para viver, com a chegada do querido Lucas.

À minha namorada pelo companheirismo, amor, dedicação e cuidado. Seu apoio é fundamental para me fazer enxergar as dificuldades de uma forma diferente.

Agradeço imensamente aos meus padrinhos, que tiveram um papel fundamental na minha educação, acompanhando de perto minha evolução como ser humano.

Ao meu orientador Jose Alberto dos Reis Parise, um agradecimento pelos ensinamentos durante a trajetória na graduação, paciência e cordialidade durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, me ajudando na melhor escolha e caminhos tomados.

Um agradecimento especial à minha falecida avó, que tanto carinho e cuidado teve por mim. Nossos finais de semana sempre foram marcantes e jamais esquecerei.

Agradeço à PUC pelo apoio incontestável e de extrema importância para minha formação.

Aos amigos que a vida me deu dentro e fora da faculdade e aos amigos que não estão mais entre nós por alguma fatalidade, um agradecimento pelos momentos vividos e que ainda temos a viver juntos.

Resumo

O presente trabalho tem por finalidade o estudo de implementação de um sistema de cogeração em um edifício comercial já em funcionamento, localizado na cidade do Rio de Janeiro. São abordados diversos assuntos teóricos, como crise energética, matriz energética, além de aspectos práticos, como equipamentos e documentos relacionados, bem como as principais vantagens que fundamentam a escolha do sistema para este empreendimento.

O objetivo final é a reutilização de calor de rejeito produzido para acionar o sistema de ar condicionado, substituindo o chiller elétrico que hoje apresenta a maior porcentagem do valor mensal de energia do prédio.

É elaborado, também, um memorial técnico tanto para o sistema de geração comum quanto para o sistema com cogeração aplicada. Esse memorial é utilizado para provar a eficiência na implementação do sistema de cogeração.

Palavras-chave: Cogeração. Energia. Refrigeração. Prédio Comercial.

Abstract

This work has the purpose of studying the implementation of a cogeneration system in a commercial building already in operation, located in the city of Rio de Janeiro. Several theoretical issues are addressed, such as energy crisis, energy matrix, as well as practical aspects, such as equipment and related documents, as well as the main advantages that support the choice of the system for this project.

The ultimate goal is to reuse waste heat produced to drive the air conditioning system, replacing the electric chiller that presents, today, the highest percentage of the monthly energy cost of the building.

A technical memorial is also prepared for both the common generation system and the system with applied cogeneration. This memorial is used to prove the efficiency in the implementation of the cogeneration system.

Keywords: Cogeneration, Energy, Refrigeration. Commercial building.

Sumário

Sumário.....	6
1. Introdução.....	10
1.1. Objetivos	10
1.2. Panorama Energético.....	10
1.3. Sistema de Cogeração	12
1.4. Organização do Trabalho	14
2. Sistema atual e demandas energéticas	15
2.1. Componentes do Sistema	17
2.1.1. Motogerador	17
2.1.2. Chiller de Compressão de Vapor.....	18
2.2. Demanda e Consumo.....	20
2.3. Memória de Cálculo do sistema sem cogeração	23
3. Sistema com Cogeração	28
3.1. Componentes do Sistema de Cogeração	29
3.1.1. Chiller de Absorção.....	29
3.1.2. Torres de Resfriamento	31
3.1.3. Bombas	32
3.1.4. Fancoil	33
4. Conclusão	43
5. Referências Bibliográficas.....	45

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	11
FIGURA 1.2 - ILUSTRATIVO DO APROVEITAMENTO E DAS PERDAS DA ENERGIA NO SISTEMA DE GERAÇÃO	13
FIGURA 1.3 - ILUSTRATIVO DO APROVEITAMENTO, REAPROVEITAMENTO E DAS PERDAS DA ENERGIA NO SISTEMA DE COGERAÇÃO	14
FIGURA 2.1 - DEMONSTRAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO ATUAL DO PRÉDIO	17
FIGURA 2.2 - MODELO DE MOTOGERADOR A GÁS	18
FIGURA 2.3 - MODELO DE CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR	20
FIGURA 2.4 - GRÁFICO DA DEMANDA TOTAL DE ENERGIA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO PRÉDIO	22
FIGURA 2.5 - GRÁFICO DA ENERGIA ATIVA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO PRÉDIO.....	23
FIGURA 3.1 - MODELO DO CHILLER DE ABSORÇÃO	31
FIGURA 3.2 - MODELO DA TORRE DE RESFRIAMENTO	32
FIGURA 3.3 - MODELO DA BOMBA HIDRÁULICA	33
FIGURA 3.4 - MODELO DE FANCOIL	35
FIGURA 3.5 – DEMONSTRAÇÃO DO PRIMEIRO SISTEMA DE COGERAÇÃO POSSÍVEL.....	37
FIGURA 3.6 – DEMONSTRAÇÃO DO SEGUNDO SISTEMA DE COGERAÇÃO POSSÍVEL.....	38

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – DADOS DO MOTOGERADOR.....	19
TABELA 2.2 – DADOS DO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR	20
TABELA 3.1 – DADOS DO CHILLER DE ABSORÇÃO.....	31
TABELA 3.2 – DADOS DA BOMBA DE ÁGUA GELADA.....	33
TABELA 3.3 – DADOS DA BOMBA DE ÁGUA DE CONDENSAÇÃO.....	33
TABELA 3.4 – DADOS DO FANCOIL	36
TABELA 3.5 – DADOS DOS EQUIPAMENTOS.....	39
TABELA 3.6 – CÁLCULOS DE REJEITO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ELÉTRICA	40
TABELA 3.7 – CÁLCULOS DE GERAÇÃO DE DEMANDA PARA O SISTEMA DE RESFRIAMENTO NO CHILLER DE ABSORÇÃO	40
TABELA 3.8 – CÁLCULOS DE GERAÇÃO DE DEMANDA PARA O SISTEMA DE RESFRIAMENTO NO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR.....	41
TABELA 3.9 – CÁLCULOS DE DEMANDA TOTAL PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	41
TABELA 3.10 – CÁLCULOS DE DEMANDA TOTAL EXATA PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ...	42

Lista de Símbolos

Acrônimos

COP COEFICIENTE DE PERFORMANCE [-]
GEE GASES DE EFEITO ESTUFA [-]

Símbolos

COP_{cv} COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR [-]
 COP_{ab} COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO CHILLER DE ABSORÇÃO [-]
 $\dot{W}_{ch_{cv}}$ TRABALHO DO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR [kW]
 \dot{Q}_{frio} DEMANDA ELÉTRICA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO [kW]
 $\eta_{el_{motog}}$ EFICIÊNCIA ELÉTRICA DO MOTOGERADOR [%]
 \dot{W}_{motog} POTÊNCIA ELÉTRICA DO MOTOGERADOR [kW]
 ε_{torre} EFICIÊNCIA DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO [%]
 T_e TEMPERATURA DE ENTRADA DA ÁGUA NA TORRE DE RESFRIAMENTO [°C]
 T_s TEMPERATURA DE SAÍDA DA ÁGUA NA TORRE DE RESFRIAMENTO [°C]
 T_{bh} TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO [°C]
 $\dot{W}_{ch_{ab}}$ TRABALHO DO CHILLER DE ABSORÇÃO [kW]
 R_{eco} RAZÃO ENTRE O CONSUMO SEM COGERAÇÃO E COM COGERAÇÃO [-]
 $E_{\%}$ VALOR ECONOMIZADO NO CONSUMO [%]

1. Introdução

1.1. Objetivos

O presente trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnica de implantação de um sistema de cogeração para um prédio comercial já em funcionamento. Tem-se como objetivo a obtenção de melhorias no desempenho global a partir da instalação do sistema de reaproveitamento de energia térmica de rejeito. Tais melhorias são a diminuição do impacto ambiental, o aumento da utilização dos recursos energéticos disponíveis, maior garantia de fornecimento de energia elétrica, além do mais importante, que é a diminuição dos gastos com o consumo de energia elétrica.

1.2. Panorama Energético

No início dos anos 1980, o mundo acabara de sair de mais uma crise do petróleo, apresentando, assim, altos valores de tarifas aplicadas sobre o combustível. Fez-se necessária, então, uma política de racionalização no consumo alertando à consciência de que os recursos energéticos eram esgotáveis. O consumo excessivo de energia já não era mais uma opção e a procura por fontes alternativas começou a crescer em todos os setores, sejam eles comerciais, residenciais ou industriais. (Santos e Novo, 2008)

A partir da década de 1990, já no fim da crise do petróleo, o Brasil ainda sentia os efeitos da crise, tornando menos frequentes os investimentos no setor energético. A falta de manutenções importantes ocasionou problemas técnicos e sucessivos apagões ocorreram em diversos estados. Os mais críticos foram o de 1999, onde 60% do território nacional foi atingido

pelo blecaute, o de 2009, com 18 estados afetados, e o de 2010, atingindo toda a região Nordeste do Brasil (O Globo, 2012).

A dependência do Brasil por hidrelétricas, que é uma fonte geradora de poucos GEE (Gases de Efeito Estufa) e causa impacto ambiental, explica os grandes apagões ocorridos. Quanto maior a capacidade de geração, mais cidades são atendidas. Sendo assim, se 60% da energia é gerada através das hidrelétricas, quando se interrompe o funcionamento de uma delas, as cidades atendidas, são prejudicadas.

A seguir, é apresentado um gráfico ilustrando a matriz energética brasileira:

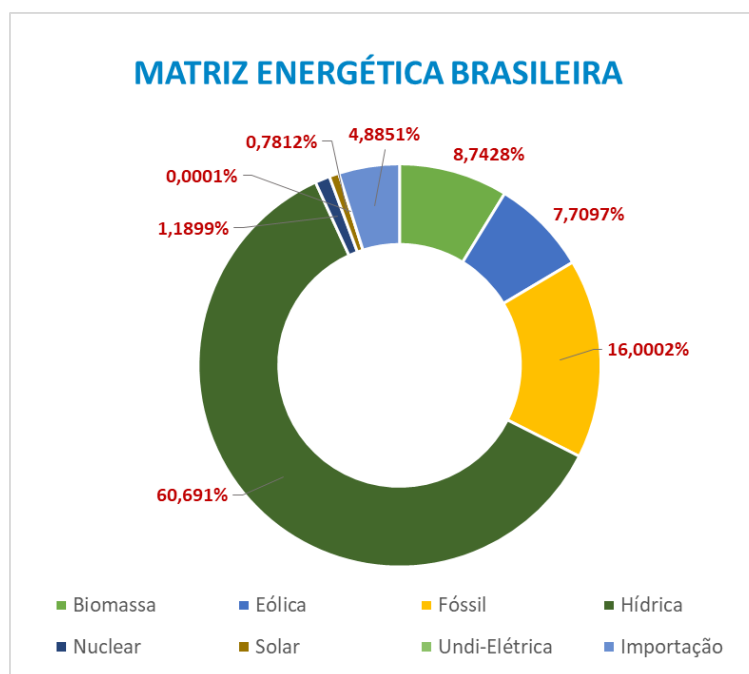


Figura 1.1 – Matriz Energética Brasileira. Fonte: Aneel (Banco de informações de geração - Matriz de energia elétrica).

Através do gráfico da Figura 1.1, pode-se perceber que o Brasil é em sua grande maioria alimentado por energia gerada em hidrelétricas. Além disso, o combustível fóssil ainda representa uma parte importante na matriz energética, sendo considerado o segundo maior sistema de geração de energia do país. Vale destacar também a geração eólica de energia, uma fonte de energia limpa, que já representa 7,7% da geração total, aumentando em mais de 50

vezes a capacidade de geração desde 2007, segundo a ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica). (Simas e Pacca, 2013)

Para suprir as necessidades atuais, segundo a Aneel, está prevista uma adição de mais de 17.600 MW na capacidade de geração, provenientes de 188 empreendimentos atualmente em construção e 406 empreendimentos que ainda terão suas obras iniciadas. (Aneel, 2018).

1.3. Sistema de Cogeração

Uma das alternativas possíveis e mais eficazes para a diminuição dos valores tarifários é o sistema de cogeração, que é um processo de produção combinada de energia térmica e elétrica a partir de uma única fonte. O calor produzido pelo próprio sistema pode ser reutilizado para aquecimento de ambientes, aquecimento da água e em chillers de absorção para produção de frio, que é o estudo em questão. Os chillers são equipamentos que trabalham com o objetivo produzir água gelada que, conseqüentemente, é utilizada para arrefecer o ar. (Castro, 2009).

O sistema de cogeração, mediante seu processo de conversão de energia, apresenta excelente eficiência, atingindo um aproveitamento de até 80% da energia do combustível. A energia convertida é utilizada no próprio sistema, substituindo a energia que antes era suprida pelo grid (energia da concessionária). Esta energia convertida, além de ser uma energia elétrica confiável e de baixo custo, reduz o consumo de combustível do equipamento, minimizando, então, a emissão de CO₂ para o ambiente e conseqüentemente o impacto ambiental. (Castro, 2009)

Neste contexto, a cogeração se apresenta como uma boa solução, visto que aponta para o uso eficiente e confiável da energia elétrica.

A seguir, são apresentadas duas figuras, 1.2 e 1.3, que ilustram a diferença entre as eficiências dos sistemas de geração bem como suas perdas. A Figura 1.2 mostra o sistema de

geração comum, sem a cogeração aplicada e a Figura 1.3 ilustra o sistema de geração já com a cogeração instalada: (Santos e Novo, 2008)

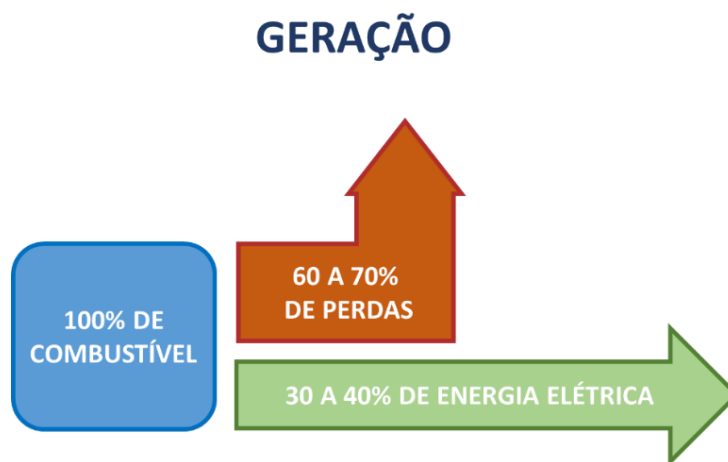


Figura 1.2 – Ilustrativo do aproveitamento e das perdas de energia no sistema de geração.
Fonte: Victor Hugo Martins (Análise Termodinâmica e Ambiental de Sistemas de Trigeração em Função de sua Arquitetura e das Demandas Energéticas).

Pode-se notar que no sistema de geração simples, as perdas de energia do sistema através de calor de rejeito representam de 60% a 70% da energia fornecida pelo combustível para o acionamento do gerador. Esta perda é significativamente maior que a energia elétrica produzida, ou seja, a maior parte da energia fornecida pelo combustível, seja ele diesel, gás natural ou carvão, nesse caso, é perdida.

O sistema de cogeração se apresenta, então, como a alternativa ideal para minimizar essas perdas de calor de rejeito, através do seu reaproveitamento. A figura 1.3 a seguir, apresenta parte dessas perdas sendo reaproveitadas pelo próprio sistema.

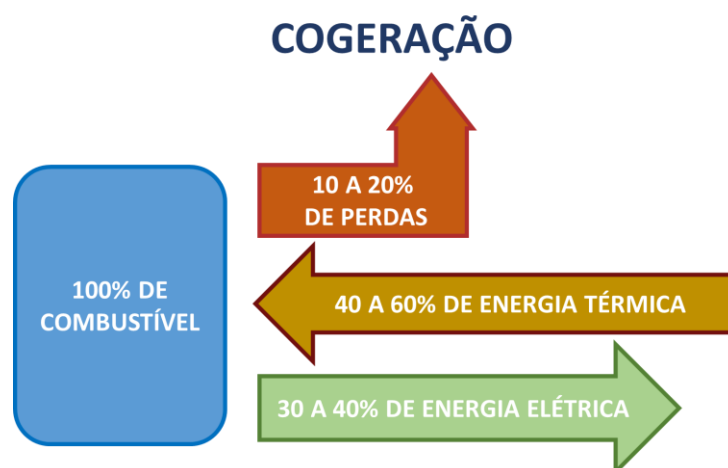


Figura 1.3 – Ilustrativo do aproveitamento, reaproveitamento e das perdas de energia no sistema de cogeração. Fonte: Victor Hugo Martins (*Análise Termodinâmica e Ambiental de Sistemas de Trigeração em Função de sua Arquitetura e das Demandas Energéticas*).

Na figura 1.3, com o sistema de cogeração aplicado, parte das térmicas do motor, cerca de 40% a 50% são usadas para acionar um chiller de absorção. Tal arranjo resultará, com esta economia de energia, na redução da emissão de CO₂ e no menor consumo de energia da concessionária. (Santos e Novo, 2008)

1.4. Organização do Trabalho

No segundo capítulo, é apresentado o prédio, seu sistema já implementado, as áreas e os equipamentos que estão sendo utilizados. Um gráfico real de demanda total, dada em kW, e de energia ativa total, em kWh são apresentados e analisados. Além disso, são calculados os valores de consumo do sistema sem cogeração através de dados reais dos equipamentos.

Na terceira parte do trabalho, estão reunidas informações sobre o sistema de cogeração, seus equipamentos a serem instalados e/ou substituídos, com o objetivo final de validar o sistema de cogeração através do reaproveitamento do calor de rejeito. Da mesma forma que o segundo capítulo, é elaborado um memorial de cálculo para o sistema com a cogeração aplicada.

Ao final do terceiro capítulo, são apresentados, analisados e comparados os resultados dos dois sistemas, com e sem cogeração. Através desses resultados, é possível determinar a viabilidade da implantação do sistema de cogeração.

O quarto capítulo visa apresentar a conclusão do trabalho, seus objetivos alcançados e melhorias relacionadas à redução de consumos e emissões.

2. Sistema atual e demandas energéticas

O edifício, com área total de aproximadamente 80000 m², é constituído de 4 pavimentos de garagem, térreo, 22 pavimentos padrão e cobertura, onde estão instalados os equipamentos do sistema de refrigeração. Os pavimentos, onde estão os escritórios corporativos de diversas empresas são subdivididos em 2 alas, chamadas de Ala 1 e Ala 2.

O sistema de geração própria de energia conta com 2 motogeradores capazes de suprir a demanda total de energia do edifício (iluminação, ar condicionado e ventilação mecânica, elevadores, etc.).

O sistema atual conta com motogerador e chiller de compressão de vapor. O princípio de funcionamento deste sistema é o seguinte: o motor térmico é utilizado para acionar o gerador. Este, por sua vez, juntamente com rede elétrica, fornece energia elétrica para o acionamento do chiller, para este atender à demanda de refrigeração (objeto de estudo do trabalho).

No modelo convencional, chamado sem cogeração, não é utilizada a recuperação de calor rejeitado pelo motor térmico. Pode-se, então, aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica para fazer a análise energética do sistema.

O modelo convencional já implementado no prédio é o apresentado a seguir:

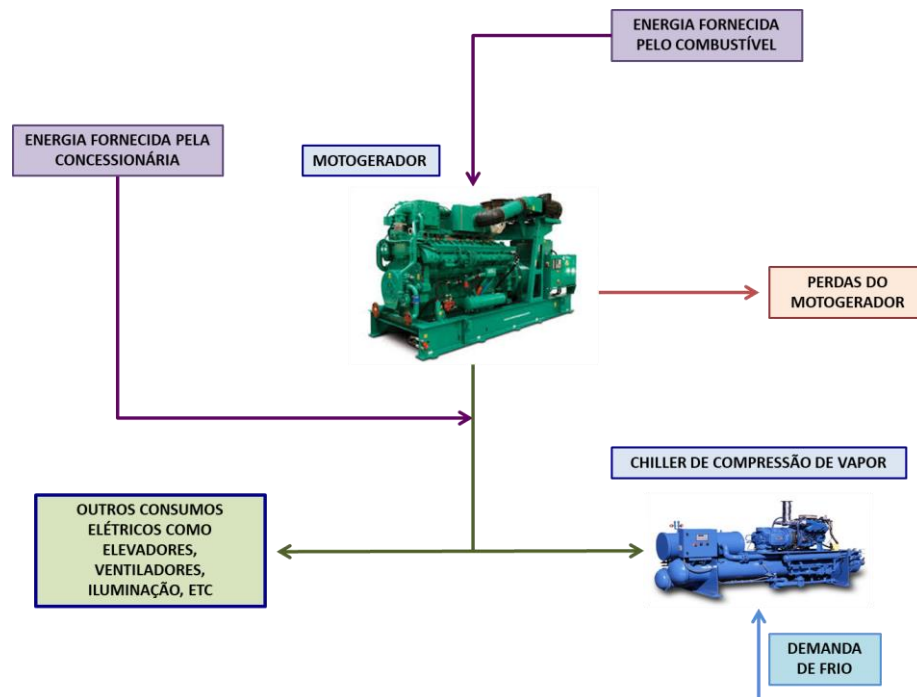


Figura 2.1 – Demonstração do sistema de geração atual do prédio.

Na imagem anterior, o motogerador é alimentado pelo combustível, através da sua queima interna pelo motor. Caso a demanda seja maior que a capacidade de geração do motogerador, o grid, que é a energia fornecida pela concessionária é acionado para suprir tal necessidade. Parte da energia recebida pelo motogerador é perdida para a atmosfera. Essas perdas estão relacionadas à taxa de calor recuperado do arrefecimento pelo motor térmico, que gira em torno de 30% da energia do combustível, e à taxa de calor recuperado da exaustão do motor térmico, que também gira em torno de 30% da energia do combustível. Além disso, ainda existe a utilização de outros 30% da energia para o eixo do motor e 10% de outras perdas. (Lanes, 2015).

A energia restante é utilizada tanto para o chiller de compressão de vapor suprir a demanda de frio, levando em consideração o COP (Coeficiente de Performance), quanto para outros equipamentos como elevadores, ventiladores e sistema de iluminação.

2.1. Componentes do Sistema

2.1.1. Motogerador

Um motogerador é um equipamento de grande porte, capaz de converter energia mecânica, através da energia química do combustível, em energia elétrica. É composto por gerador, motor responsável pelo acionamento do dispositivo e tanque de combustível para alimentação do motor. Trata-se de uma máquina utilizada para suprir as necessidades energéticas de determinado local, seja como fonte principal ou complementar. (Tecnogera, 2015).



Figura 2.2 – Modelo de motogerador a gás. Fonte: Cummins

O motogerador apresenta eficiências elétrica e térmica variando conforme seu consumo. Com carga total (100%), as eficiências elétrica e térmica chegam a 41,9% e 43,2% respectivamente resultando, assim, em uma eficiência total de 85,1% da sua energia. Quando o consumo é menor, isto é, trabalhando em carga parcial de 50% por exemplo, a eficiência do equipamento cai, chegando a 38,8% de eficiência elétrica e 40,0% de eficiência térmica. O combustível utilizado é o gás natural, escolhido devido à menor emissão de gases poluentes. A vazão de combustível chega a 350m³/h e a potência total é de 2385kW.

A fim de obter as potências elétrica e térmica do equipamento, dadas em kW, bem como suas eficiências, dadas em porcentagem, em diferentes cargas de operação, faz-se necessária a análise do datasheet. A tabela 2.1 a seguir apresenta os valores informados:

Tabela 2.1 – Dados do motogerador. Fonte: Cummins.

INFORMAÇÕES DO MOTOGERADOR			
Carga em Operação	100%	75%	50%
Potência Eletromecânica (kW)	2385	1827	1290
Eficiência Elétrica (%)	41,9	41,0	38,8
Potência Elétrica (kW)	999,3	749,1	519,9
Eficiência Térmica (%)	43,2	42,3	40,0
Potência Térmica (kW)	1030,3	772,8	516

2.1.2. Chiller de Compressão de Vapor

O Chiller de compressão de vapor é composto por conjunto compressor, motor, evaporador, condensador e uma válvula de expansão, responsável pelo controle de fluxo do fluido refrigerante. Dependendo do tipo de compressor, do fluido refrigerante e do condensador (a ar ou a água) serão necessários alguns componentes auxiliares, tais como recipiente de líquido, separador de líquido, resfriador de óleo, separador de óleo, dispositivo de retorno de óleo, bomba de óleo, unidade de purga, dispositivos que aliviam a pressão para o fluido refrigerante e válvulas e elementos de controle adicionais. (Whitman, 2008)

Sua maior desvantagem é o alto consumo de energia dos compressores, que são comumente chamadas de cargas parasitas. (ASHRAE, 2008).

O presente trabalho se baseia em um sistema real, resultando em perdas no seu próprio sistema. Sendo assim, o ciclo ideal leva em consideração a queda de pressão ocorrida devido ao atrito tanto no condensador quanto no evaporador. Deve-se considerar, também, a perda de energia térmica para o ambiente durante a compressão.

A eficiência do equipamento, por sua vez, varia conforme a carga em operação. Como apresentado na tabela a seguir, quando o equipamento está trabalhando com carga total, ou seja, 100%, o COP do sistema é maior do que trabalhando em carga parcial de 75% ou 50%. Estes valores serão importantes na hora de calcular o consumo total de combustível.

Tabela 2.2 – Dados do chiller de compressão de vapor. Fonte: Johnson Control

INFORMAÇÕES DO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR			
Carga em Operação	100%	75%	50%
Carga Térmica (kW)	2715	2065	1356
COP	4,32	4,21	4,08

A seguir está apresentado um modelo de chiller de compressão de vapor:



Figura 2.3 – Modelo de Chiller de Compressor de Vapor. Fonte: Johnson Control.

Para o chiller de compressão de vapor, deve ser levada em consideração a variação no consumo e na carga térmica. Como já mencionado, a variação do consumo, que depende diretamente da temperatura ambiente externa, faz com que o valor do COP seja variável. A eficiência do equipamento, portanto, depende diretamente do COP, como demonstrado na equação seguinte:

$$COP_{cv} = \frac{\text{Carga térmica do chiller (kW)}}{\text{Consumo do chiller (kW)}} \quad (1)$$

Através da equação anterior, pode-se notar que quanto maior o consumo do chiller, menor será o seu COP. Isso significa que se o chiller de compressão está consumindo mais, o seu coeficiente de performance (COP), irá cair, como já era esperado. No entanto, se a carga térmica produzida aumenta, consequentemente o seu COP será maior.

2.2. Demanda e Consumo

Um sistema de automação instalado permitiu a leitura de dados através dos pontos instalados em todo o prédio. A cada leitura, em um intervalo de tempo determinado pelo responsável pelo sistema, há o armazenamento em um banco de dados interno. Foram coletadas, então, as demandas e energias ativas do sistema de refrigeração do prédio. Esses dados serão utilizados para se obter a potência necessária dos equipamentos para que essa demanda de refrigeração seja suprida integralmente. Através dos dados coletados, foi possível construir um gráfico da demanda de frio, dada em kW, e da energia ativa total, dada em kWh, durante um período de 1 ano.

A seguir, é apresentado o gráfico da demanda de refrigeração do prédio, tanto em horário de ponta que, na cidade do Rio de Janeiro, começa às 17:30h e termina às 20:30h (Light, 2018), quanto em horário fora de ponta, que são todas as outras horas do dia. Os valores são fornecidos em kW. Os valores mais altos representam as demandas em horário fora de ponta, que são normalmente na parte da tarde, onde a temperatura externa é maior. Já os valores, mais baixos, são referentes ao horário de ponta, que normalmente é quando a maioria das pessoas já terminaram o expediente do dia e não estão mais no prédio. Nesse caso, o sistema de refrigeração é menos exigido e, por isso, a demanda é menor.

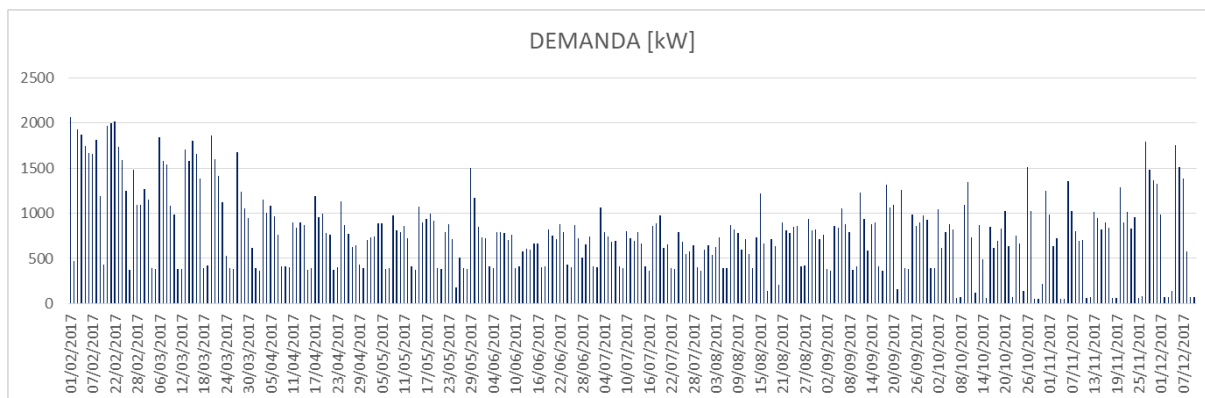


Figura 2.4 – Gráfico da demanda total de energia do sistema de refrigeração do prédio.

No gráfico da Figura 2.4, como já informado, a demanda de frio do sistema de refrigeração está apresentada no eixo Y. Já o eixo X representa as datas referentes à essas demandas.

A demanda elétrica é a quantidade de energia elétrica que foi transformada em trabalho em um determinado intervalo de tempo. Normalmente as medições das demandas tem intervalos de 15 minutos. (Light, 2018)

O gráfico de demanda apresenta um perfil côncavo. Este comportamento é devido ao fato de a temperatura externa no verão ser maior que a temperatura externa no inverno. Quando se tem uma temperatura externa maior, é preciso que o sistema de refrigeração aumente a sua potência para chegar à um conforto térmico no interior do prédio. Isso resulta em um consumo maior de energia.

A demanda, portanto, acompanha o clima ambiente externo. Quanto mais calor, maior a demanda de energia. Isso explica porque o gráfico está com este formato: nos meses de verão (nas extremidades esquerda e direita do gráfico) a demanda foi muito maior que nos meses de inverno (centro do gráfico).

A seguir, está apresentado o gráfico de energia ativa do prédio, tanto em horário de ponta quanto fora. Este gráfico também foi obtido através dos valores fornecidos pelo sistema

de automação do prédio e representa a quantidade de energia fornecida no período. Os valores são dados em kWh.

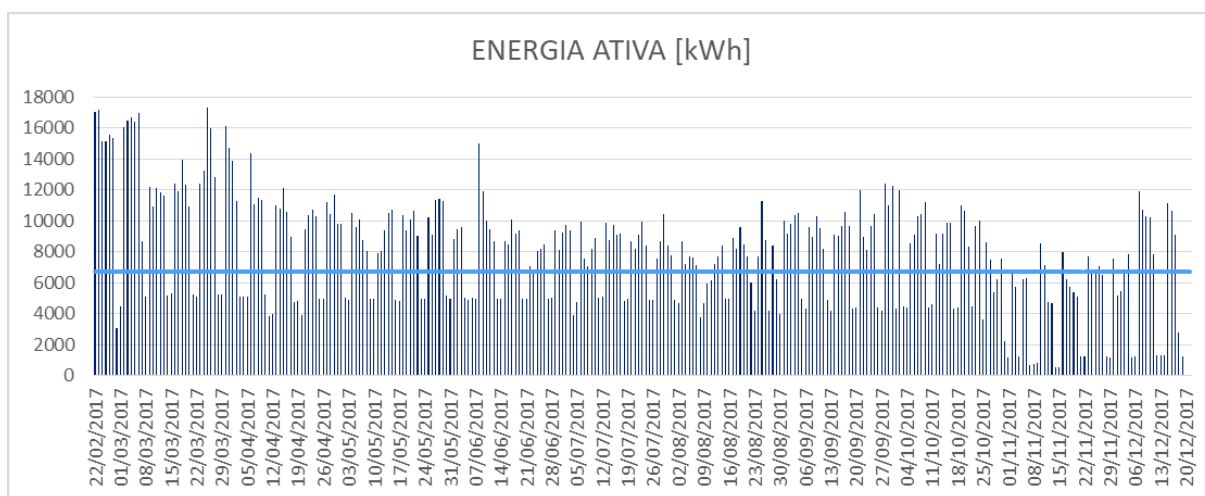


Figura 2.5 – Gráfico da energia ativa do sistema de refrigeração do prédio.

Além da curva de energia ativa do sistema de refrigeração do prédio, é apresentada, também, a média da energia ativa dos outros sistemas que consomem energia, tais como elevadores, ventiladores, iluminação, bombas, entre outros. Esta média de energia ativa está sendo representada pela linha horizontal em azul com tonalidade mais clara. Os demais equipamentos citados acima, são responsáveis por um consumo de aproximadamente 56% da energia total do prédio em média. Para se chegar a este valor médio, foi feita uma análise na conta de luz do prédio e, retirado do total consumido, o valor do consumo do sistema de refrigeração. Além disso, outras fontes foram pesquisadas a fim de embasar esta conclusão e, de acordo com Felipe Lanes, em seu trabalho de conclusão de curso, este valor médio pode ser adotado devido ao fato de o consumo com os outros sistemas apresentar comportamento constante ao longo do ano, ou seja, tanto no verão quanto no inverno, não importa a temperatura externa, os sistemas trabalharão da mesma forma a fim de suprir suas necessidades.

A Energia ativa total é o quanto de energia foi consumido em um determinado intervalo de tempo. Este gráfico segue o mesmo comportamento do gráfico de demanda (côncavo) devido

ao aumento do consumo em dias quentes, no entanto, no mês de dezembro, este consumo é menor porque os funcionários entram de férias ou trabalham em regime diferenciado, devido ao feriado de final de ano.

Com esses gráficos de demanda e energia ativa total, além dos valores diários no intervalo de um ano, pode-se encontrar os valores necessários de potência de cada equipamento e finalmente provar a viabilidade da implementação do sistema de cogeração.

2.3. Memória de Cálculo do sistema sem cogeração

Nesta memória de cálculo, o consumo de combustível será obtido tanto para o caso de carga total do sistema de refrigeração e, conseqüentemente, em carga total do chiller de compressão de vapor, quanto em carga parcial, que é comumente chamada de “part load”.

Como nos gráficos de demanda e consumo do prédio, os valores são variáveis e na maior parte do tempo as demandas serão menores que a capacidade total do chiller, é importante esse cálculo com diferentes consumos.

PARA O CASO DE 100% DE DEMANDA DE FRIO:

A fim de encontrar o consumo elétrico necessário do motogerador para atender à demanda elétrica do chiller de compressão de vapor que, por sua vez, supra à demanda de frio do sistema de refrigeração, deve ser levado em consideração a equação a seguir, que é a razão entre a demanda de frio do sistema de refrigeração do prédio e o trabalho, que é o valor consumido em eletricidade pelo chiller de compressão para suprir essa demanda, dada pela seguinte fórmula:

$$\dot{W}_{chcv} = \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP_{cv}} \quad (2)$$

Como o COP_{cv} é 4,32 (adimensional), que foi calculado através da carga do chiller, e a demanda elétrica do sistema de refrigeração, dada pela Figura 2.4, é de aproximadamente 2200kW, obtém-se o seguinte valor de trabalho do chiller de compressão:

$$\dot{W}_{chcv} = 509,26 \text{ kW} \quad (3)$$

Este valor deve ser utilizado para encontrar o consumo elétrico que o motogerador deverá consumir para que seja atendida a demanda elétrica do chiller de compressão de vapor. Para isso, é importante aplicar a eficiência elétrica, dada pelo fabricante no data sheet. Sabendo que a eficiência elétrica vale $\eta_{el} = 41,9\%$ pode-se obter a potência elétrica necessária para gerar os 509,26 kW de trabalho do chiller de compressão. Portanto, através da fórmula a seguir, encontra-se o consumo de combustível:

$$\eta_{elmotog} = \frac{\dot{W}_{chcv}}{\dot{W}_{motog.}} \quad (4)$$

E, portanto, o consumo do motogerador, será de:

$$\dot{W}_{motog.} = 1215,42 \text{ kW} \quad (5)$$

Tem-se, então, que o motogerador consome 1215,42 kW de combustível para que a demanda de frio do sistema de refrigeração do prédio seja suprida integralmente.

No entanto, deve-se atentar para que, além dos 509,26 kW da demanda de frio, a demanda dos outros sistemas do prédio, como elevadores, ventiladores, bombas e iluminação, que representam 400 kW em média, também seja atendida. Sendo assim, o consumo de combustível no motogerador será de:

$$\eta_{el_{motog.}} = \frac{\dot{W}_{ch_{cv}}}{\dot{W}_{motog.}} \quad (6)$$

E, portanto, o consumo de combustível será de:

$$\dot{W}_{motog.} = 2170,07 \text{ kW} \quad (7)$$

Este valor representa a quantidade de combustível consumida pelo motogerador para suprir a demanda elétrica do chiller de compressão de vapor e este, por sua vez, atenda à demanda de refrigeração do sistema através de carga térmica.

PARA O CASO DE 50% DE DEMANDA:

Neste caso, será considerada a demanda de 50% do sistema de refrigeração. É importante calcular esta demanda devido ao fato de o motogerador trabalhar com carga parcial na maior parte do tempo. Dessa forma, assim como no cálculo de 100% de demanda, a fim de encontrar o consumo necessário para a suprir a demanda de frio do sistema, deve ser levado em consideração a seguinte fórmula:

$$COP_{cv} = \frac{\dot{Q}_{frio}}{\dot{W}_{ch_{cv}}} \quad (8)$$

Como o COP_{cv} é 4,08 (adimensional), quando em carga parcial de 50%, e a demanda de frio, dada pela Figura 2.1, é de aproximadamente 1100 kW, obtém-se o valor consumido:

$$\dot{W}_{chcv} = 269,60 \text{ kW} \quad (9)$$

Este valor representa quanto de energia elétrica é consumida pelo chiller de compressão de vapor para que este seja capaz de suprir os 1100 kW de demanda de frio do sistema.

Portanto, o chiller de compressão de vapor necessita de 269,60 kW elétricos, que deverão ser fornecidos pelo motogerador. Para isso, considerando que a eficiência elétrica do motogerador vale $\eta_{el} = 40,0\%$, pode-se obter o consumo de combustível necessário para gerar os 269,60 kW consumidos pelo chiller de compressão de vapor. Através da fórmula a seguir, obtém-se o consumo de combustível no motogerador:

$$\eta_{el_{motog.}} = \frac{\dot{W}_{chcv}}{\dot{W}_{motog.}} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{motog.} = 674 \text{ kW} \quad (11)$$

O motogerador consome, portanto, 674 kW para suprir à carga elétrica necessária no chiller de compressão.

Calculando da mesma forma que em carga total (100%), deve-se atentar para a demanda dos outros sistemas do prédio, que não à refrigeração, que representam 400 kW em média de demanda elétrica. Somando esse valor ao consumo no motogerador, obtém-se o seguinte consumo de combustível:

$$\eta_{el_{motog.}} = \frac{\dot{W}_{chcv}}{\dot{W}_{motog.}} \quad (12)$$

$$\dot{W}_{motog.} = 1674 \text{ kW} \quad (13)$$

Portanto, o motogerador consome 1674 kW de combustível para que seja suprida tanto a demanda de refrigeração do prédio quanto à demanda dos outros sistemas.

Comparando os dois casos, pode-se dizer que o consumo do chiller de compressão de vapor está entre 269,60 kW (carga parcial de 50%) e 509,26 kW (carga total de 100%), enquanto que o consumo do motogerador está entre 1674 kW (carga parcial de 50%) e 2170,07 kW (carga total de 100%).

3. Sistema com Cogeração

O modelo com cogeração aplicada conta com a recuperação de calor de rejeito com a finalidade de aumentar a eficiência do sistema. Neste caso, são estudadas duas situações: a primeira é substituindo o chiller de compressão de vapor pelo chiller de absorção, onde o chiller de absorção seria capaz de suprir a demanda de frio e a segunda é a adição do chiller de absorção ao sistema, mantendo assim, o chiller de compressão de vapor para suprir alguma necessidade quando o chiller de absorção não for suficiente para suprir a demanda de frio do sistema de refrigeração. Este chiller de absorção, que será acionado termicamente pelo calor de rejeito do motorizador, atende à demanda de refrigeração.

Algumas hipóteses devem ser levadas em consideração para o estudo em questão (Silva, 2017):

- O sistema opera em regime permanente;
- A demanda de refrigeração deve ser imposta ao chiller para que seja atendida em sua totalidade a fim de minimizar a queima de combustível para suprimento;
- A demanda de eletricidade deve ser suprida pelo motorizador. Por isso, deve ser dada a devida importância para o seu dimensionamento;
- A temperatura de rejeição de calor deve ser suficientemente alta para acionar o chiller.

Para implementação do sistema de cogeração, é extremamente importante o entendimento do seu sistema e equipamentos.

3.1. Componentes do Sistema de Cogeração

3.1.1. Chiller de Absorção

Assim como os chillers de compressão de vapor, os chillers de absorção também possuem evaporador, condensador e válvula de expansão. O processo de refrigeração dos chillers de absorção, por sua vez, não utiliza a compressão de vapor para elevar a pressão do fluido refrigerante e, portanto, trabalham a baixa pressão. Este processo é realizado por meio da absorção do fluido refrigerante no estado vapor e com baixa pressão, por um fluido absorvente.

O chiller tem acoplado ao absorvedor, um evaporador formando um vaso único, comumente chamado de evaporador-absorvedor. Do lado do evaporador, o líquido refrigerante evapora quando entra em contato com tubos de cobre, onde circulam o líquido que se quer resfriar, que nesse caso é a água. Perto do absorvedor, uma solução de LiBr (Brometo de Lítio) absorve o refrigerante evaporado, transformando-o em solução diluída que é enviada para o gerador, onde é aquecida até liberar o refrigerante contido, e então, volta a ter a concentração inicial, possibilitando a absorção do vapor refrigerante da mesma maneira do início do ciclo. O refrigerante é enviado para o condensador, onde será condensado através do contato com os tubos de cobre do condensador, nos quais circula internamente a água que vem da torre de resfriamento, onde a temperatura é baixa o suficiente para permitir a condensação. (Godini, 2018).

Os chillers de absorção apresentam COP muito baixo, normalmente entre 0,7 e 1,2 (considerando chiller com fluido refrigerante de LiBr-H₂O). No entanto, se comparar com o custo da fonte de energia térmica, que pode ser totalmente gratuito, dependendo da porcentagem

de calor de rejeito que é reaproveitado, o valor final será bem menor. (Ministério do Meio Ambiente, 2017)

A seguir é apresentado um modelo de chiller de absorção.

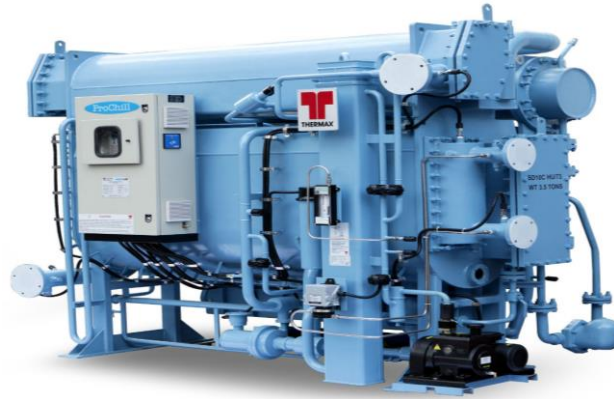


Figura 3.1 – Modelo de Chiller de Absorção. Fonte: Thermax

A seguir, estão apresentados a capacidade de resfriamento do chiller de absorção, dada em Toneladas de refrigeração (TR) e kW, a quantidade de calor disponível, que é a quantidade de carga calorífica disponível, dada em kW, e o COP, que é o coeficiente de performance do chiller, ou seja, quanto consome para gerar uma determinada carga térmica:

Tabela 3.1 – Dados do chiller de Absorção. Fonte: Fabricante (Thermax)

Carga em operação	100%	75%	50%
Capacidade de Resfriamento – TR (kW)	2584,9	1938,4	1292,5
Taxa de calor de acionamento (kW)	3640	2920	2124
COP do chiller de Absorção (%)	0,71	0,71	0,71

3.1.2. Torres de Resfriamento

Apesar de existirem vários tipos diferentes de torres de resfriamento, os princípios de funcionamento são basicamente os mesmos. Na maioria das torres, o funcionamento se baseia no de “resfriamento evaporativo”, que é o processo pelo qual a água mais quente, oriunda de um processo, é bombeada para a parte de cima da torre, mais precisamente no sistema de distribuição de água. Então, a água é então distribuída através dos dutos da torre de resfriamento para o interior, na bacia molhada. Simultaneamente, o ar é sendo succionado através das grelhas, resultando na evaporação da água. A evaporação faz com que o calor latente seja removido da água de reposição. O ar quente sobe naturalmente.

A Torre de Resfriamento, portanto, é responsável por remover o calor usado e enviá-lo para a atmosfera. O líquido é então resfriado, chegando a uma temperatura próxima à chamada temperatura de bulbo úmido. Durante esse processo, volumes de água evaporam, diminuindo a temperatura da água que está circulando no interior da torre de resfriamento.



Figura 3.2 – Modelo de Torre de Resfriamento. Fonte: Alpina

A eficiência da Torre de resfriamento pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{torre} = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_{bh}} \quad (14)$$

Onde:

- ε_{torre} é a eficiência da torre de resfriamento;
- T_e é a temperatura de entrada da água na torre de resfriamento;
- T_s é a temperatura de saída da água na torre de resfriamento;
- T_{bh} é a temperatura de bulbo úmido do ar;

3.1.3. Bombas

As bombas são utilizadas para transportar os líquidos. Funcionam através da conversão da energia cinética da rotação do seu eixo do motor para energia hidrodinâmica fazendo com que o fluxo da água seja realizado.

O princípio de funcionamento é a entrada do fluido, através de um bocal, na bomba. Essa entrada é através de um bocal, por onde a bomba faz a sucção do líquido. Posteriormente, o fluido passa através de um rotor, ganhando energia e transferindo a energia cinética em potencial, através do ganho de pressão. Logo após, o fluido sai, também através de um bocal, chamado de bocal de recalque.

As bombas podem ser instaladas de duas formas:

- Abaixo do reservatório: nesse caso, são chamadas negativas, ou afogadas. Estão instaladas abaixo do nível do reservatório e fazem a sucção por gravidade. São consideradas melhores instalações pois costumam apresentar menos problemas com relação à cavitação, por exemplo.

- Acima do reservatório: chamados de sucção positiva. As bombas são instaladas acima do nível do reservatório. É necessária, portanto, uma maior potência para sucção, devido à ação da gravidade.



Figura 3.3 – Modelo de bomba hidráulica. Fonte: KSB

Foram selecionadas as seguintes bombas de água gelada e de água de condensação respectivamente:

Tabela 3.2 – Dados da bomba de água gelada. Fonte: KSB.

BOMBA DE ÁGUA GELADA	
Vazão	390 m ³ /h
Pressão	30 mca
Rotação	1750 rpm

Tabela 3.3 – Dados da bomba de água de condensação. Fonte: KSB.

BOMBA DE ÁGUA DE CONDENSAÇÃO	
Vazão	408 m ³ /h
Pressão	47 mca
Rotação	1750 rpm

3.1.4. Fancoil

É um equipamento comumente utilizado para refrigerar ambientes no qual os climatizadores convencionais não suprem a refrigeração demandada devido às suas potências.

São recomendados para sistemas com grandes cargas térmicas, como prédios, shoppings, hospitais, dentre outros. (Nazareth e Moura, 2013)

O princípio de funcionamento é parecido com o de um evaporador comum, no entanto, não utiliza gás refrigerante, mas sim, água. A água é tratada, além de ser mantida em temperatura controlada. O ar é direcionado para o sistema de filtragem através de um ventilador e posteriormente insuflado para a serpentina que, por sua vez, é insuflado para o ambiente. Quando essa água é insuflada, o ambiente é climatizado e, portanto, o calor que existia no ambiente é extraído e levado ao chiller, onde ocorre a condensação na Torre de Resfriamento. Feita a condensação, a água volta ao sistema novamente. (Nazareth e Moura, 2013).

É interessante ressaltar que, no caso de grandes empreendimentos, é necessário adotar medidas que privilegiem a certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que é uma certificação internacional utilizada para empreendimentos que geram economia de energia. Neste caso, a escolha do Fancoil é um importante passo para conseguir essa certificação.



Figura 3.4 – Modelo de Fancoil. Fonte: Trox.

O fancoil escolhido para integrar o sistema é o seguinte:

Tabela 3.4 – Dados do Fancoil. Fonte: Trox.

FANCOIL		
Fabricante		Trox
Modelo		ICV-50 Posição HF
Dados Gerais de Seleção	Capacidade Total	120 kW
	Capacidade Sensível	108 kW
	Capacidade Latente	13 kW
	Vazão de insuflação	33650 m ³ /h
	Vazão de Ar externo	260 m ³ /h
Dados Técnicos Serpentina	Vazão de Água Gelada	15,7 m ³ /h
	Pressão estática	53 mmca
	Motor Elétrico	15 cv / IV polos
	Perda de carga	12 mmca

Como já mencionado anteriormente, existem 2 maneiras possíveis de arquitetura para a implementação do sistema de cogeração. A primeira é substituindo o chiller de compressão pelo chiller de absorção para que este, caso seja capaz, supra a demanda de frio do sistema. Já a segunda arquitetura é adicionando o chiller de absorção no sistema e, caso este não seja capaz de suprir a demanda de frio, o chiller de compressão de vapor atenda à esta necessidade. A seguir serão apresentadas estas duas arquiteturas possíveis do sistema de cogeração que podem ser implementadas.

1ª ARQUITETURA POSSÍVEL:

A primeira arquitetura substitui o chiller de compressão de vapor pelo chiller de absorção. Neste novo sistema, a demanda de frio deverá ser atendida pelo chiller de absorção que, por sua vez, será suprido pela energia térmica do calor de rejeito do motogerador. Abaixo segue uma figura esquemática deste primeiro possível sistema:

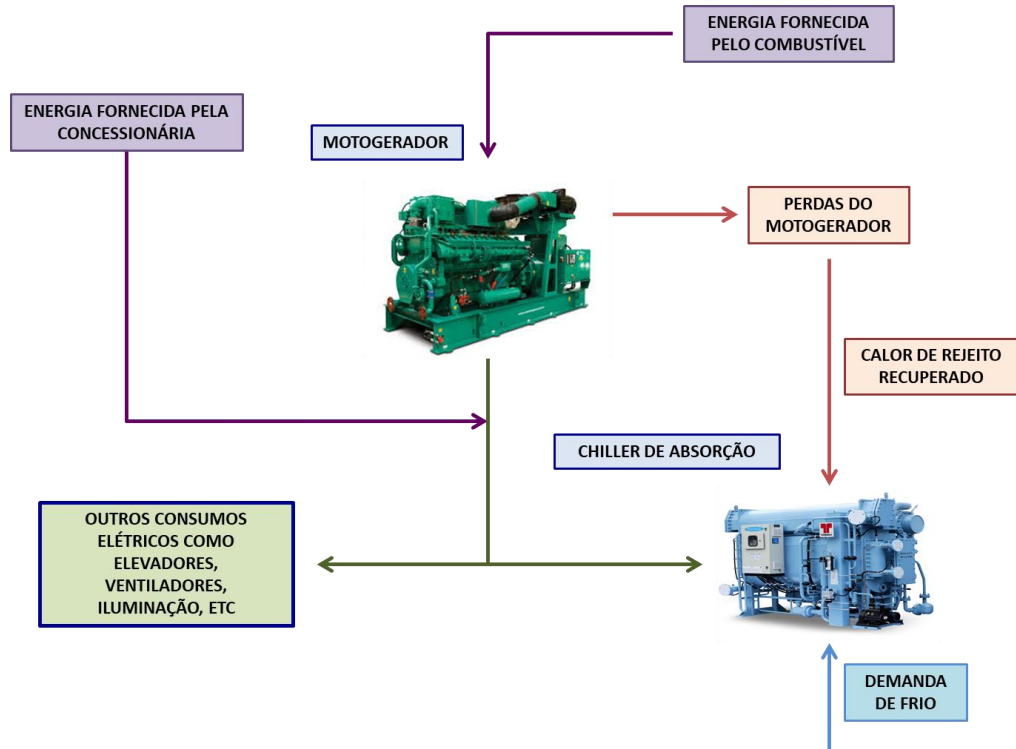


Figura 3.5 – Demonstração do primeiro sistema de cogeração possível.

Com a demanda máxima de frio do sistema de ar condicionado, que é de 2200 kW, e o COP do chiller de absorção de 0,71, obtém-se a necessidade de energia térmica para suprir tal demanda, como apresentado abaixo:

$$\dot{W}_{chab} = \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP_{ab}} \quad (15)$$

$$\dot{W}_{chab} = 3098,59 \text{ kW} \quad (16)$$

Com a carga máxima do motogerador em operação, que é de 2385 kW, considerando que a eficiência elétrica é de 41,9%, obtém-se a seguinte carga térmica de rejeito:

$$\eta_{elmotog.} = \frac{\dot{W}_{chab}}{\dot{W}_{motog.}} \quad (17)$$

$$\dot{W}_{motog.} = 1385,68 \text{ kW} \quad (18)$$

Portanto, a carga térmica de rejeito, mesmo com o motogerador funcionando a plena carga (100%), não suprirá a necessidade do chiller de absorção atender à demanda de frio do sistema de refrigeração. É necessário, portanto uma nova arquitetura.

2ª ARQUITETURA POSSÍVEL:

A arquitetura do segundo sistema possível é a seguinte:

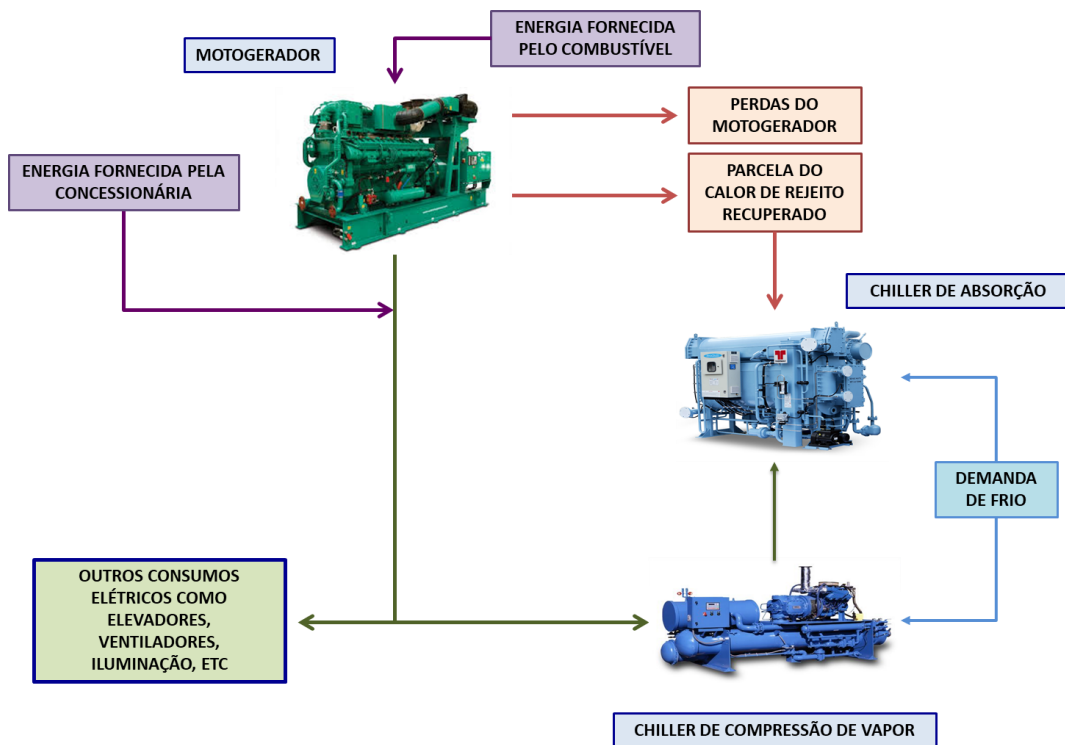


Figura 3.6 – Demonstração do segundo sistema de cogeração possível.

Neste caso, o princípio de funcionamento do sistema é o seguinte:

- A demanda de frio do sistema de refrigeração deverá ser suprida integralmente, e acontecerá de duas formas. O chiller de absorção, através do calor de rejeito do motogerador, fará a conversão de energia térmica em energia elétrica, levando em

consideração o COP do equipamento, que é de 0,71. Caso esse calor de rejeito não seja suficiente para suprir a demanda total de frio do sistema de refrigeração, o chiller de compressão de vapor será acionado para atender esta diferença. A utilização do chiller de compressão de vapor se dará através da energia elétrica gerada no motogerador, e deverá ser levado em consideração o seu COP, que é de aproximadamente 4.

O início dos cálculos é o mesmo do anterior. Com a demanda máxima de frio do sistema de ar condicionado de 2200 kW e o COP do chiller de absorção de 0,71, obtém-se a necessidade de energia para suprir tal demanda, como apresentado abaixo:

$$\dot{W}_{ch_{ab}} = \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP_{ab}} \quad (19)$$

$$\dot{W}_{ch_{ab}} = 3098,59 \text{ kW} \quad (20)$$

A seguir, estão apresentados todos os dados necessários para a realização dos cálculos.

Tabela 3.5 – Dados dos equipamentos. Fonte: Cummins/Johnson Control/Thermax

INFORMAÇÕES DO MOTOGERADOR			
Carga em Operação	100%	75%	50%
Potência Eletromecânica (kW)	2385	1827	1290
Eficiência Elétrica (%)	0,419	0,41	0,388
Potência Elétrica (kW)	999,3	749,1	519,9
Eficiência Térmica (%)	0,432	0,423	0,400
Potência Térmica (kW)	1030,3	772,8	516
INFORMAÇÕES DO CHILLER DE COMPRESSÃO DE VAPOR			
Carga em Operação	100%	75%	50%
Carga térmica (kW)	2715	2065	1356
COP	4,32	4,21	4,08
INFORMAÇÕES DO CHILLER ABSORÇÃO			
Carga em operação	100%	75%	50%
Capacidade de Resfriamento – TR (kW)	2584,9	1938,4	1292,5
Taxa de calor de acionamento (kW)	3640	2920	2124
COP do chiller de Absorção (%)	0,71	0,71	0,71

Foram utilizadas diferentes cargas de operação do motogerador, a fim de encontrar os valores de carga térmica e elétrica que serão utilizados pelo chiller de compressão de vapor e pelo chiller de absorção. Na tabela a seguir estão apresentados os respectivos valores de carga térmica de rejeito e carga elétrica geradas.

Tabela 3.6 – Cálculos de rejeito térmico e eficiência elétrica.

			Rejeito térmico (43,2%) [kW]	Eficiência elétrica (41,9%) [kW]
Geração do Motogerador	500	kW	290,5	209,5
	700	kW	406,7	293,3
	800	kW	464,8	335,2
	900	kW	522,9	377,1
	1000	kW	581	419
	1100	kW	639,1	460,9
	1200	kW	697,2	502,8
	1300	kW	755,3	544,7
	1500	kW	871,5	628,5
	1700	kW	987,7	712,3
	1900	kW	1103,9	796,1

A carga térmica de rejeito calculada na tabela anterior é enviada para o acionamento do chiller de absorção. É necessário aplicar sobre ela o valor do COP do chiller de absorção: 0,71. Portanto o valor real de carga de calor de rejeito é menor, como apresentado na tabela a seguir:

Tabela 3.7 – Cálculos de geração de demanda para o sistema de resfriamento no chiller de absorção.

			Geração de demanda para o sistema de resfriamento (kW)
Chiller de Absorção	500	kW	206,26
	700	kW	288,76
	800	kW	330,01
	900	kW	371,26
	1000	kW	412,51
	1100	kW	453,76
	1200	kW	495,01
	1300	kW	536,26
	1500	kW	618,77
	1700	kW	701,27
	1900	kW	783,77

A outra parte da carga gerada no motogerador, chamada carga elétrica gerada, é então enviada para o chiller de compressão de vapor a fim de gerar mais carga a ser transferida para o chiller de absorção. Aplicando-se o COP do chiller de compressão, que é 4,32, obtém-se os seguintes valores:

Tabela 3.8 – Cálculos de geração de demanda para o sistema de resfriamento no chiller de compressão de vapor.

	Carga do motogerador		Geração de demanda para o sistema de resfriamento (kW)
Chiller de Compressão de Vapor	500	kW	905,04
	700	kW	1267,056
	800	kW	1448,064
	900	kW	1629,072
	1000	kW	1810,08
	1100	kW	1991,088
	1200	kW	2172,096
	1300	kW	2353,104
	1500	kW	2715,12
	1700	kW	3077,136
	1900	kW	3439,152

A tabela anterior apresenta os valores que serão utilizados para suprir a demanda de frio no chiller de absorção.

Tabela 3.9 – Cálculos de demanda total para o sistema de refrigeração.

Carga do motogerador		Demanda total a ser entregue ao sistema de resfriamento
500	kW	1111,295
700	kW	1555,813
800	kW	1778,072
900	kW	2000,331
1000	kW	2222,59
1100	kW	2444,849
1200	kW	2667,108
1300	kW	2889,367
1500	kW	3333,885
1700	kW	3778,403
1900	kW	4222,921

Sabendo de antemão que o consumo está entre 1350 kW e 1450 kW e que o valor de demanda de frio a ser suprida é de 3098,56 kW, aproxima-se a tabela para obter um valor de carga mais exato.

Tabela 3.10 – Cálculos de demanda total exata para o sistema de refrigeração.

Carga do motogerador		Demanda total a ser entregue ao sistema de resfriamento
1350	kW	3000,4965
1360	kW	3022,7224
1370	kW	3044,9483
1380	kW	3067,1742
1390	kW	3089,4001
1400	kW	3111,626
1410	kW	3133,8519
1420	kW	3156,0778
1430	kW	3178,3037
1440	kW	3200,5296
1450	kW	3222,7555

O valor, portanto, é de 1400kW de consumo de combustível no motogerador para que se possa suprir toda a demanda do prédio.

Para comprovar a eficácia do sistema proposto, deve-se verificar a economia de combustível com a implementação do sistema de cogeração. No sistema sem cogeração, foi obtido um consumo de 2170,07 kW. Já no sistema com cogeração aplicada, o consumo foi de 1400 kW. Portanto, aplicando uma razão entre os dois valores, pode-se verificar a economia no consumo entre os dois sistemas.

$$R_{eco} = \frac{1400}{2170,07} = 0,645 \quad (21)$$

O valor de R_{eco} apresentado acima representa a razão entre o valor gasto entre o sistema com cogeração e o sistema sem cogeração. Para se obter o valor percentual economizado no consumo, deve-se aplicar a seguinte fórmula:

$$E_{\%} = 100 * (1 - R_{eco}) \quad (22)$$

Portanto, o valor economizado no consumo entre os sistemas sem e com cogeração é o seguinte:

$$E_{\%} = 35,5\% \quad (23)$$

A economia, portanto, é de 35,5% em relação ao sistema sem cogeração.

Este valor é bastante significativo quando se diz respeito à uma economia de mais de 1/3 do consumo. A emissão de gases poluentes para a atmosfera, além da diminuição dos custos de energia térmica, que é uma energia de alta qualidade e confiabilidade, e elétrica é bem menor.

4. Conclusão

Neste trabalho, foram estudadas e comparadas duas arquiteturas possíveis para o sistema de cogeração, além de apresentar o modelo atual do sistema de geração do prédio. Os três modelos foram analisados e avaliados por um estudo de balanço térmico, a partir da demanda de refrigeração do prédio estudado. A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que:

- Os sistemas de cogeração podem operar em diferentes arquiteturas. Apresentam mais eficiência quando comparados a um sistema convencional sem recuperação do calor de rejeito;
- As eficiências (1ª e 2ª Leis da termodinâmica, e emissões de CO₂) dependem das demandas energéticas do sistema;
- Na maior parte do tempo, o sistema de cogeração não irá operar em seu ponto ótimo, onde o calor de rejeito recuperado para aquecimento se iguala à demanda;
- O sistema deverá operar longe de seu ponto ótimo, devido às demandas energéticas;

Apesar do COP do chiller com compressor de vapor ser bem maior que o COP do chiller de absorção, se a fonte de calor do chiller de absorção for o rejeito de calor de outro processo, ou seja, energia com baixo custo, ainda assim o chiller de absorção combinado ao chiller de compressão de vapor pode ser a melhor solução. Então, mesmo que o COP seja um item muito importante na análise do custo operacional, não é possível se manter preso à comparação dos valores numéricos simplesmente, devido às grandes diferenças que existem entre eles.

A implementação do sistema de cogeração se torna viável, uma vez que a diminuição do consumo de combustível, resultará em uma economia significativa para a administradora do prédio.

5. Referências Bibliográficas

ELECTO EDUARDO S. LORA; JAMIL HADDAD. Geração Distribuída: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais. 1ªed. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2006.

RUI M. G. CASTRO. Introdução à Cogeração: Energias Renováveis e Produção Descentralizada, ed. 2.0, 2009

SÉRGIO DA SILVA BRANDÃO. Cogeração. Trabalho no âmbito da cadeira: Produção e Planejamento de Energia Elétrica, 2004.

FELIPE PORTES LANES. Operação de sistemas de trigerção com diferentes arquiteturas e em função de demandas de eletricidade, aquecimento e refrigeração, 2015.

VICTOR HUGO MARTINS. Análise Termodinâmica e ambiental de sistemas de trigerção em função de sua arquitetura e das demandas energéticas, 2017.

JOSEPH A. ORLANDO. Cogeneration Design Guide, 1996.

KEITH E. HEROLD; REINHARD RADERMACHER; SANFORD A. KLEIN. Absorption Chillers and Heat Pumps, 1996.

JOSE A. R. PARISE, LUIS C. CASTILHO MARTÍNEZ, RUI PITANGA MARQUES, JESÚS BETANCOURT MENA, JOSÉ V. C. VARGAS. A study of the thermodynamic performance and CO₂ emissions of a vapour compression bio-trigeneration system, 2010.

FERNANDO BUTIERRES DOS SANTOS, LUCIANA MORGANI ALVES NOVO. Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo, 2008.

BILL WHITMAN, Refrigeration and Air conditioning Technology, Delmar, 2008.

O GLOBO. “Brasil enfrenta longo histórico de apagões”. <<https://oglobo.globo.com/economia/brasil-enfrenta-longo-historico-de-apagoes-11503038>> Acesso em 21/05/2018.

TECNOGERA. “Você sabe o que são geradores ?”. <<https://www.tecnogera.com/blog/voce-sabe-o-que-sao-geradores>> Acesso em 20/05/2018.

CHARLES GODINI. “Funcionamento e aplicações dos chillers por absorção” <<http://www.engenhariaearquitectura.com.br/2018/04/funcionamento-e-aplicacoes-dos-chillers-por-absorcao>> Acesso em 27/05/2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Ar Condicionado – Manual sobre sistema de água gelada, 2017.

FELIPE MEDEIROS DE NAZARTH; FELIPE CADE MOURA. Estudo de viabilidade econômica para a implantação de um sistema de ar condicionado utilizando a termoacumulação, 2013.