

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DA ENERGIA**

Climatização Distrital: Proposta Metodológica e Estudo de Caso

Fábio José Horta Nogueira

Itajubá, abril de 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DA ENERGIA**

Fábio José Horta Nogueira

**Climatização Distrital: Proposta Metodológica e Estudo de Caso**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.

Área de concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Orientador: Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

Abril de 2015

Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DA ENERGIA**

Fábio José Horta Nogueira

Climatização Distrital, Proposta Metodológica e Estudo de Caso

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de abril de 2015 conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos (orientador)

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira (coorientador)

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Prof. Dr. José Antônio Perrela Balestieri (membro externo)

Itajubá, Minas Gerais

Abril de 2015

# DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai, ele faz jus a isso por muitas razões. Separo aqui os três motivos que considero mais interessantes. Primeiramente, porque ele percebeu muito cedo que eu gostava de desmontar as coisas, e que possuía certa habilidade, pois algumas delas eu montava de novo. E foi dando corda, me incentivando. Em segundo lugar, o “seu Vavá” foi quem mais me incentivou a estudar e aprender. Em terceiro, porque esse trabalho trouxe de volta recordações da nossa convivência lá na “roça”, pois lá nós tínhamos uma geladeira que funcionava a querosene...

## **AGRADECIMENTOS**

Dou graças por tudo que eu tenho, minha saúde, minha mente, minha vida ...

Também agradeço a todos que me ajudaram na realização deste trabalho e aqueles que ficaram na torcida dando aquele empurrão espiritual.

A minha esposa Meiry, meu filho Guilherme e minha filhota Thais, por favor me desculpem pelo nervosismo e pelas noites mal dormidas.

Aos amigos e colegas da iX Estudos e Projetos que seguraram as pontas quando foi preciso me ausentar.

Ao pessoal da Associação da Indústria da Cogeração de Energia – Cogen, já que as primeiras ideias desse trabalho surgiram em conversas por lá.

Aos membros da banca, professores Electo Silva Lora, José Perrella Balestieri e Afonso Henriques Santos, que também me orientou.

Agradeço aos meus mestres, pois eu nunca me esqueci das boas aulas e ensinamentos que recebi.

Por fim agradeço a todos os meus alunos, pois eu acredito que eu tenho certeza que aprendi muito mais do que eu ensinei.

## RESUMO

O objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição de sistemas convencionais de ar condicionado em edifícios, que usam compressores frigoríficos acionados por motores elétricos, por sistemas empregando cogeração, com motores a gás natural acoplados a sistemas frigoríficos (*chillers*) usando ciclos de absorção. Dessa forma, incrementa-se a eficiência energética e se substitui o consumo de energia elétrica por gás natural, um combustível cada vez mais presente na matriz energética brasileira. Nesse sentido propõe-se um método usando imagens de satélite para localizar espacialmente onde se encontram essas demandas de energia térmica empregadas para climatização. Também são sugeridas outras alternativas para essa tarefa de localização. Como essas demandas de energia térmica podem estar distribuídas de forma muito difusa, depois de identificadas e caracterizadas, elas são agrupadas de forma a tornar essas cargas mais aptas para a implantação das centrais de cogeração. Após esse processo de concentração é feita uma seleção e ordenamento automatizado dessas centrais usando critérios tais como a proximidade das redes de dutos de gás natural, subestações de energia elétrica, e disponibilidade de terrenos vagos. São realizadas análises energéticas para determinar os montantes de energia térmica e elétrica que são transacionados. Finalmente, considerando os custos de aquisição e implantação dos equipamentos necessários, bem como as tarifas vigentes para eletricidade e gás natural, é feita uma análise econômica para verificar a viabilidade econômica dessa alternativa para atender as demandas de energia térmica para climatização. Após a apresentação da metodologia, efetua-se um estudo de caso considerando uma região do município de São Paulo, com a identificação de uma possível central e o desenvolvimento dos estudos energético e de viabilidade econômica.

Palavras-chave: cogeração, sistemas de absorção, ar condicionado

## **ABSTRACT**

The aim of this study is to evaluate the technical and economic feasibility of substitution of conventional air conditioning systems in buildings that use electric powered cooling compressors, by systems using cogeneration, adopting natural gas engines coupled to chillers using absorption cycles. Thus is increased the energy efficiency and the consumption of electricity is replaced by natural gas, a fuel increasingly present in the Brazilian energy matrix. A method using satellite images to locate spatially the cold loads is proposed. Other alternatives are suggested for such locating task. Once identified and characterized the cooling demand, which may be distributed diffusely, a grouping process is performed in order to make more suitable the implementation of cold generating plants. After this process of clustering is made a selection and automated ranking of such plants using criteria such as proximity network of natural gas pipelines, electric power substations and available terrains. Energy analyzes are performed to determine the thermal and electrical energy amounts are traded. Finally, considering cost and deployment of equipment, as well as the tariffs for electricity and natural gas is made an economic assessment to verify the feasibility of this cooling alternative. After the presentation of the methodology, a case study is developed considering a region of São Paulo city, with the identification of a possible central and the development of associated energy studies and economic viability analysis.

**Keywords:** cogeneration, absorption systems, air conditioning

# SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| Capítulo I - INTRODUÇÃO .....                                     | 1  |
| I.1 - Objetivo .....  | 1  |
| I.2 - Objetivos Específicos .....                                 | 1  |
| I.3 - Justificativa do Trabalho.....                              | 2  |
| I.4 - Premissa Adotada .....                                      | 4  |
| Capítulo II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                         | 5  |
| II.1 - O Ar Condicionado.....                                     | 5  |
| II.1.1 - Histórico .....  | 5  |
| II.1.2 - As diversas formas de produzir baixas temperaturas ..... | 7  |
| II.1.3 - Equipamentos empregados .....                            | 11 |
| II.2 - Cogeração e Ar Condicionado.....                           | 12 |
| II.2.1 - Vantagens da cogeração .....                             | 13 |
| II.2.2 - Resfriamento e climatização usando cogeração .....       | 14 |
| II.3 - Exemplos de Sistemas de Cogeração e Climatização .....     | 15 |
| II.3.1 - Parque das Nações .....                                  | 16 |
| II.3.2 - DHC Shinjuku, Tokyo .....                                | 18 |
| II.3.3 - Shopping Iguatemi – Salvador .....                       | 19 |
| II.3.4 - Edifício Rochaverá .....                                 | 20 |
| II.3.5 - Edifício Word Trade Center .....                         | 21 |
| II.4 - Trabalhos sobre Sistemas de Cogeração e Climatização.....  | 21 |
| II.5 - Sistemas de Informação Geográfica .....                    | 23 |
| II.6 - Análise Resumida da Legislação .....                       | 24 |
| II.6.1 - Cogeração .....  | 25 |
| II.6.2 - Comercialização de Energia Elétrica.....                 | 26 |
| II.6.3 - Incentivos para Cogeração.....                           | 27 |
| II.6.4 - Gás Natural .....  | 28 |
| II.6.5 - Eficiência Energética .....                              | 29 |
| II.6.6 - Uso de bens públicos municipais.....                     | 30 |
| II.6.7 - Meio ambiente .....                                      | 31 |
| Capítulo III - METODOLOGIA DO TRABALHO .....                      | 33 |
| III.1 - Localização das cargas de resfriamento .....              | 34 |
| III.1.1 - Cruzamento de bancos de dados .....                     | 34 |



|  |    |
|--|----|
| III.1.2 - Envio de questionários .....                           | 36 |
| III.1.3 - Usando fotografias e imagens de satélites .....        | 39 |
| III.1.4 - Método da Janela Móvel .....                           | 41 |
| III.1.5 - Concentração das cargas térmicas de climatização ..... | 42 |
| III.2 - Localização das centrais de cogeração .....              | 46 |
| III.3 - Estudos Energéticos .....                                | 50 |
| III.4 - Planilha de cálculo .....                                | 62 |
| Capítulo IV - ANÁLISE DO USO .....                               | 67 |
| IV.1 - Levantamento de Ar Condicionado .....                     | 67 |
| Capítulo V - RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO.....                   | 72 |
| V.1 - Localização das Cargas de Resfriamento .....               | 72 |
| V.2 - Localização das Centrais de Cogeração .....                | 77 |
| V.3 - Análise Energética da Central de Cogeração .....           | 81 |
| V.1 - Análise de Viabilidade Econômica .....                     | 88 |
| Capítulo VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....                    | 90 |
| Capítulo VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                  | 92 |
| Capítulo VIII - ANEXOS .....                                     | 98 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela III.1 - Unidades consumidoras identificadas e consumo estimado.....              | 41 |
| Tabela III.2 – Capacidade, potência e rendimento nominal para vários equipamentos. .... | 54 |
| Tabela III.3 – Rendimento de alguns motores a gás.....                                  | 57 |
| Tabela III.4 – Coeficientes da equação do rendimento de motores. ....                   | 58 |
| Tabela III.5 – Coeficientes de performance para <i>chillers</i> à absorção. ....        | 61 |
| Tabela III.6 – Tarifas de energia elétrica da AES Eletropaulo.....                      | 65 |
| Tabela III.7 – Tarifas para compra de gás natural da Comgás. ....                       | 66 |
| Tabela V.1 - Unidades consumidoras identificadas e consumo estimado.....                | 72 |
| Tabela V.2 – Coordenadas e energia das centrais de cogeração. ....                      | 75 |
| Tabela V.3 – Resultados da pontuação das centrais de cogeração.....                     | 80 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura II.1 – Componentes de um sistema frigorífico de compressão. ....          | 8  |
| Figura II.2 – Ciclo de refrigeração teórico. ....                                | 9  |
| Figura II.3 – Componentes de um sistema frigorífico por absorção. ....           | 10 |
| Figura II.4 – Sistema com distribuição de água a “4 tubos”. ....                 | 12 |
| Figura II.5 – Vista aérea do Parque das Nações (Google Earth). ....              | 17 |
| Figura II.6 – Esquema da rede de distribuição água quente e gelada.....          | 17 |
| Figura II.7 – a) Prédios em Shinjuku. b) <i>Chiller</i> de 10.000 TR. ....       | 18 |
| Figura II.8 – Esquema do DHC de Shinjuku.....                                    | 19 |
| Figura II.9 – a) Shopping Iguatemi. b) Motor utilizado na central. ....          | 20 |
| Figura II.10 – a) Entrada do Rochaverá. b) Um dos quatro motores da planta. .... | 20 |
| Figura II.11 – a) Fachada do WTC. b) Um dos três motores da planta.....          | 21 |
| Figura III.1 - Divisão da metodologia empregada nesse trabalho.....              | 33 |
| Figura III.2 – Localização das cargas usando bancos de dados. ....               | 35 |
| Figura III.3 – Regiões que foram pesquisadas. ....                               | 37 |
| Figura III.4 – Distribuição dos tipos de imóveis na amostra total.....           | 38 |
| Figura III.5 – Localização dos prédios ao longo da Av. Brig. Faria Lima.....     | 39 |
| Figura III.6 – Limites da região selecionada para este trabalho.....             | 40 |
| Figura III.7 – a) Dutos em uma calçada. b) Duto de grande diâmetro. ....         | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura III.8 - Exemplo do procedimento de janela móvel.....  | 44 |
| Figura III.9 – Produto final da primeira etapa desse trabalho. ....                                | 45 |
| Figura III.10 – Produto final da segunda etapa desse trabalho.....                                 | 49 |
| Figura III.11 – Demandas de potência elétrica e térmica. ....                                      | 51 |
| Figura III.12 – Modelo de um chiller elétrico. ....  | 53 |
| Figura III.13 – Variação do Rendimento com a Capacidade Frigorífica. ....                          | 54 |
| Figura III.14 – Variação do rendimento com o carregamento do equipamento.....                      | 55 |
| Figura III.15 – Modelo de grupo motor gerador a gás. ....  | 56 |
| Figura III.16 – Rendimento de motores a gás. ....  | 58 |
| Figura III.17 – Variação do rendimento de motores com o carregamento.....                          | 59 |
| Figura III.18 – Modelo usado para o chiller de absorção.....                                       | 60 |
| Figura III.19 – Rendimento pelo carregamento em chillers de absorção.....                          | 62 |
| Figura III.20 – Planilha desenvolvida para o trabalho.....   | 64 |
| Figura IV.1 – Distribuição dos tipos de imóveis por região.....                                    | 67 |
| Figura IV.2 – Porcentagem de questionários válidos por região.....                                 | 68 |
| Figura IV.3 – Tipos de equipamentos observados. ....   | 69 |
| Figura IV.4 – Idade dos equipamentos de ar condicionado. ....                                      | 70 |
| Figura IV.5 – Carga térmica unitária nos escritórios. ....   | 70 |
| Figura IV.6 – Carga térmica unitária nos centros comerciais. ....                                  | 71 |
| Figura V.1 – Imóveis observados mostrados durante o levantamento.....                              | 73 |
| Figura V.2 – Tipos de imóveis observados no levantamento.....                                      | 73 |
| Figura V.3 – Consumo nos imóveis observados. ....  | 74 |
| Figura V.4 – Localização das 26 maiores cargas de resfriamento. ....                               | 76 |
| Figura V.5 – <i>Shapefiles</i> utilizados para a classificação das centrais. ....                  | 77 |
| Figura V.6 – <i>Shapefiles</i> utilizados para a classificação das centrais no estudo de caso..... | 78 |
| Figura V.7 – Potência térmica sem considerar acumulação de gelo. ....                              | 82 |
| Figura V.8 – Potência térmica com acumulação de gelo. ....   | 83 |
| Figura V.9 – Potência elétrica no estudo de caso, com acumulação. ....                             | 83 |
| Figura V.10 – Diagrama de Sankey para a situação convencional. ....                                | 85 |
| Figura V.11 – Diagrama de Sankey, situação proposta em paridade térmica. ....                      | 86 |
| Figura V.12 – Diagrama de Sankey, situação proposta em paridade elétrica. ....                     | 87 |



## ***Capítulo I - INTRODUÇÃO***

Esse trabalho apresenta uma nova abordagem para o estudo e análise dos sistemas de ar condicionado. Aqui se propõe a substituição dos sistemas centralizados convencionais por modernos equipamentos de cogeração e de resfriamento por absorção usando distribuição por água gelada. Além das demandas de energia térmica para climatização e dos equipamentos disponíveis para uma instalação de ar condicionado, também se considera sua posição geográfica em relação às demais cargas ou centrais de cogeração.

O texto está dividido sete capítulos, o primeiro deles é esta introdução. Depois, no segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica dos temas mais importantes que são pertinentes a esse assunto. No terceiro capítulo é descrita a metodologia que é utilizada no decorrer de todo o trabalho. No quarto capítulo é feita uma análise de como se dá o uso desses sistemas de ar condicionado. Um estudo de caso demonstrando o método que está se propondo é apresentado no quinto capítulo. As conclusões desse trabalho e as recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros estão mostradas no sexto capítulo. O sétimo e último deles contém a lista das referências bibliográficas.

### ***1.1 - Objetivo***

O objetivo principal proposto para este trabalho é o de se estudar as condições técnicas e econômicas para a instalação de unidades de água gelada utilizadas para o condicionamento ambiental de edifícios e condomínios adotando sistemas de absorção e avaliar os benefícios e as suas implicações frente às alternativas convencionais. Será dada prioridade para o uso do gás natural e para os sistemas de descentralizados de cogeração.

### ***1.2 - Objetivos Específicos***

Além do objetivo principal que foi anteriormente citado também procura-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Fazer uma revisão bibliográfica dos principais assuntos que estão envolvidos com esse tema, abordando os sistemas de ar condicionado, de cogeração e de distribuição de energia térmica para climatização;



- Analisar as legislações federais, estaduais e municipais verificando as implicações e as restrições destas na instalação e na operação dos sistemas de ar condicionado;
- Pesquisar com os principais fabricantes quais são os equipamentos que estão disponíveis para compor os sistemas de ar condicionado que serão instalados;
- Criar modelos que reproduzam o comportamento energético dos equipamentos de produção e de distribuição de água gelada;
- Propor um método para a seleção dos locais mais indicados para a instalação das centrais de cogeração utilizando sistemas de informações geográficas;
- Propor uma forma simples para a análise técnico-econômica verificando a viabilidade da implantação dos sistemas de ar condicionado que serão propostos;
- Realizar um estudo de caso para instalação de um sistema de ar condicionado em um prédio ou condomínio na cidade de São Paulo.

### ***1.3 - Justificativa do Trabalho***

O trabalho que foi desenvolvido se justifica com base nos argumentos que estão listados abaixo:

- A obrigação de atender as condições térmicas adequadas para o conforto humano e necessidades técnicas específicas dos prédios, condomínios e indústrias resulta em demandas térmicas e elétricas que podem ser bastante significativas, alcançando muitas vezes valores da ordem de algumas dezenas de MW. Como ilustração, em São Paulo, próximo da ponte do Morumbi, está em planejamento adiantado a construção de um complexo predial com previsão de uma demanda elétrica em torno de 50 MW e de mais 80 MW térmicos. Ressalta-se que essa área já está congestionada e apresenta dificuldades para o fornecimento de energia.
- Por outro lado, o suprimento realizado de forma convencional para atender essas demandas pode encontrar restrições consideráveis devido às dificuldades de expansão das redes elétricas de distribuição, pois, normalmente, as subestações já se encontram sobrecarregadas, as linhas de transmissão estão operando no limite e as passagens e os caminhos estão muito congestionados;
- Outro fato importante e que atualmente tem merecido muito destaque é a necessidade de diversificação da matriz energética do país. A forte dependência da energia de fontes hidrelétricas tem deixado o país refém das variações climáticas. Isso pode ser amenizado



com o uso adequado das outras fontes de energia que estão sendo disponibilizadas. Segundo previsões da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, a potência hidrelétrica instalada vai crescer cerca de 40% até 2021, no mesmo período a capacidade de armazenamento do Sistema Interligado Nacional – SIN vai aumentar apenas 5% e nesse intervalo a participação da energia hidrelétrica no país será reduzida de 72% para 64% (EPE – 2013).

- Observa-se também que haverá um aumento significativo da oferta interna de gás natural, e convenientemente, isto está para acontecer justamente quando se tem a necessidade de lançar mão de novas fontes de energia. A EPE no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2022 faz projeções de que a produção líquida de gás natural no Brasil passe de 40 milhões m<sup>3</sup>/dia para mais de 160 milhões de m<sup>3</sup>/dia (EPE – 2013).
- Mas ainda assim o gás natural é um combustível de origem fóssil e com recursos finitos. Por isso mesmo ele deve ser usado com a maior eficiência possível. Dessa forma aproveitam-se as vantagens energéticas dos sistemas de cogeração, que tem a característica de utilizar os combustíveis de forma nobre e com rendimentos globais elevados;
- Um argumento que também é voltado ao aumento da eficiência da operação é a possibilidade da substituição dos sistemas de ar condicionado convencionais, que possuem uma eficiência reduzida, por equipamentos com tecnologia mais moderna e com rendimentos bem mais elevados, conseguindo-se significativas economias de energia;
- Também existem locais onde existe a necessidade de fornecimento ininterrupto de energia, tais como hospitais e centros de processamento de dados. Para essas aplicações os sistemas propostos se encaixam perfeitamente, pois servem também como uma fonte reserva de energia;
- Dependendo da potência que foi instalada em motores e na relação entre a demanda de energia térmica para climatização e a demanda elétrica existe a alternativa para a exportação de energia elétrica operando em paralelo com a rede da concessionária possibilitando a comercialização dos excedentes que forem gerados.



### ***I.4 - Premissa Adotada***

Esse trabalho tem como objetivo principal a análise da aplicação de sistemas de ar condicionado com água gelada produzida por meio de refrigeração por absorção associados a motores movidos a gás natural acionando geradores elétricos. Isto é, em vez de sistemas de ar condicionado convencionais propõe-se a substituição por conjuntos de cogeração de energia conjugados a máquinas de refrigeração por absorção.

Isso implica no uso de equipamentos de maior capacidade, maior porte físico e com alguma complexidade operacional. Desse modo, eles não se destinam para serem usados em pequena escala, por exemplo, nas residências e locais onde as cargas térmicas são reduzidas.



## ***Capítulo II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

Nesse capítulo é feita uma revisão dos tópicos mais importantes que estão envolvidos nesse trabalho. Inicialmente são tecidas algumas definições básicas e apresentado um breve histórico dos sistemas de ar condicionado. Mostra-se quais os processos usados para o resfriamento e é feita uma breve revisão nos principais conceitos dos ciclos termodinâmicos de refrigeração apontando as diferenças entre os que operam com compressão e os que usam absorção. Em seguida apresentam-se os principais equipamentos disponíveis para serem empregados nos sistemas de ar condicionado. Na sequência são descreve-se o uso da cogeração acoplada aos sistemas para a produção de água gelada para uso em ar condicionado.

Também são apresentados casos de sucesso da aplicação da centrais de cogeração utilizadas para atender as demandas de energia de climatização em algumas localidades fora do Brasil. Por último é feita uma rápida análise da legislação pertinente, nas esferas federal, estadual e municipal.

### ***II.1 - O Ar Condicionado***

Pode-se definir o ar condicionado como sendo um fluxo de ar que passa continuamente por processos de tratamento e de modificações das suas características físicas com o objetivo de se alterar e controlar quatro parâmetros fundamentais: a temperatura, a umidade, o grau de pureza e a vazão desse ar.

A temperatura do ar que está sendo tratado é o principal fator que está envolvido durante as trocas térmicas entre esse ar e o que está presente no ambiente a ser condicionado. Ela deverá ser elevada quando se deseja o efeito de calefação, ou seja, quando existe a necessidade de introduzir calor no espaço condicionado. Em caso contrário, quando a finalidade é a retirada de calor do ambiente condicionado, é necessário reduzir a temperatura desse ar.

#### ***II.1.1 - Histórico***

Certamente o tipo de clima existente na Terra foi um dos fatores mais importantes para o aparecimento, o desenvolvimento e a sobrevivência de todas espécies de vida que se conhece. A cadeia biológica está ligada a isso de modo tão íntimo, que dependendo do tipo de clima e de local, a vida pode resultar em espécies completamente diferentes.





No caso da espécie humana, os homens primitivos ficaram muito expostos a esses rigores extremos do clima. Principalmente, porque logo em seguida de um calor abrasador a Terra passaria por uma onda de glaciações que deixaram as temperaturas muito baixas. Mas os primeiros humanos deram um salto tecnológico enorme, aprenderam a dominar e a produzir o fogo. Assim, usando a sua proteção, a sua luz e o seu calor e com algumas peles de animais sobre o corpo eles foram contornando o problema do frio e acabaram sobrevivendo.

Depois de passar algum bom tempo, os humanos enfrentavam uma situação completamente antagônica. Agora era o calor que incomodava. Na antiga Roma os construtores faziam circular água pelo interior das paredes das casas dos ricos para amenizar o calor. Os chineses e persas captavam os ventos e direcionavam as correntes de ar para passar sobre a água reduzindo a sua temperatura (NEEDHAM, 1986) (LINDSAY, 2005).

No entanto, de forma semelhante ao que aconteceu com o fogo, somente após os estudos apresentados em 1720 por William Cullen é que se aprendeu realmente a trabalhar e produzir fluidos com temperaturas mais baixas, o que era essencial para os futuros sistemas de refrigeração e ar condicionado, pois antes disso isso ainda era extraído da natureza na forma de gelo ou de neve (CULLEN, 1756).

Atualmente considera-se que o pai dos sistemas de ar condicionado foi o médico americano John Gorrie. Em 1851 ele obteve a patente de uma máquina de fazer gelo empregada nos primitivos sistemas de ar condicionado. Naquela época acreditava-se que as doenças tropicais, principalmente a malária, eram causadas pelos *miasmas dos pântanos* e com a introdução de ar em temperatura mais baixa nos quartos dos doentes o problema seria amenizado (RAYMOND, 1972) (GLADSTONE, 1998).

O avanço das técnicas de refrigeração também impulsionou o uso dos sistemas de ar condicionado e essas duas áreas foram se desenvolvendo em paralelo. No entanto, o primeiro uso prático e em maior escala do ar condicionamento do ar não foi usado para o conforto humano. A história do ar condicionado moderno teve o seu início no úmido verão nova-iorquino de 1902 (CARRIER, 2013). Uma indústria gráfica enfrentava sérios problemas em seus trabalhos, pois a umidade excessiva do ar era absorvida pelo papel, resultando em imagens borradas e escuras. Para resolver a questão o engenheiro Willis Carrier desenvolveu um sistema que fazia o ar circular por dutos resfriados artificialmente. O processo, que controlava a temperatura e umidade da fábrica, foi o primeiro exemplo do condicionamento mecânico de ar.



Não demorou para que o sucesso da invenção se espalhasse, sendo a indústria têxtil o grande mercado para o condicionador de ar. A falta de umidade nas fábricas causava muita eletricidade estática, dificultando a tecelagem. Os sistemas de ar condicionado controlavam a umidade do ar, reduzindo o problema da eletricidade estática e impulsionando a indústria de tecidos. Isso foi se difundindo em outros setores, como papel, produtos farmacêuticos e tabaco.

A primeira aplicação residencial do ar-condicionado se deu em 1914 (CARRIER, 2013). No mesmo ano, foi instalado o primeiro condicionador de ar hospitalar. Esse equipamento introduzia uma quantidade extra de umidade em um berçário de partos prematuros, ajudando a reduzir a mortalidade causada pela desidratação.

Nos países da América do Norte e da Europa os modelos de aparelhos de ar condicionados residenciais começaram a ser produzidos em massa nos meados do século passado. Nas décadas seguintes, estes produtos já não eram mais novidade. No Brasil o uso do ar condicionado até pouco tempo atrás era algo restrito aos ambientes de luxo mas tem se expandido de forma acentuada, principalmente nessas últimas duas décadas (CARRIER, 2013).

Hoje o mercado que é voltado ao ar condicionado é formado por empresas de amplitude mundial e está em constante expansão, com muito espaço para o desenvolvimento tecnológico e para o lançamento de novos produtos.

### II.1.2 - *As diversas formas de produzir baixas temperaturas*

Em princípio pode-se conseguir redução da temperatura a partir de qualquer fenômeno físico ou químico que seja de natureza endotérmica. Entre os processos endotérmicos mais usados podem ser citados os seguintes (DA COSTA, 1982):

- Fusão de sólidos como gelo comum de água ou gelo seco;
- Mistura de substâncias, por exemplo, o sal de cozinha, com água, gelo comum ou gelo seco.
- Fenômenos de adsorção química;
- Efeito termoelétrico;
- Efeito termomagnético.
- Expansão de um gás comprimido;
- Vaporização de um líquido puro ou de uma solução binária;

Os dois primeiros processos são descontínuos e são limitados a pequenas escalas de produção. Enquanto que os demais podem ser associados aos seus inversos, de modo a permitir a produção contínua.

Os fenômenos de adsorção são empregados nas máquinas de sílica-gel e a sua operação se assemelha com os equipamentos de absorção. Os equipamentos que empregam os fenômenos termoelétricos e termomagnéticos são de pequeno porte e estão ainda em desenvolvimento.

A expansão dos gases é adotada nas máquinas frigoríficas a ar e na indústria da liquefação dos gases. A vaporização contínua de um líquido pode ser obtida por meio de processos mecânicos nas ditas máquinas de compressão de vapor ou por meio de aquecimento, método que é empregado nas máquinas de absorção.

A vaporização dos líquidos é o processo mais empregado atualmente e está presente na grande maioria dos equipamentos de refrigeração e de ar condicionado que são utilizados nas indústrias, no setor de serviços e nas residências e por essa razão será o processo utilizado e analisado durante esse trabalho. Os demais fenômenos são utilizados em aplicações específicas ou muito especiais (DA COSTA, 1982).

Um exemplo do resfriamento usando a vaporização de líquidos é o sistema mostrado na Figura II.1. Ele é composto por quatro componentes conectados entre si: um compressor, um condensador, a válvula de expansão e o evaporador. No interior desse sistema escoam continuamente, em circuito fechado, um fluido frigorífico especial que é o responsável pelo transporte da energia de um componente para outro do equipamento.

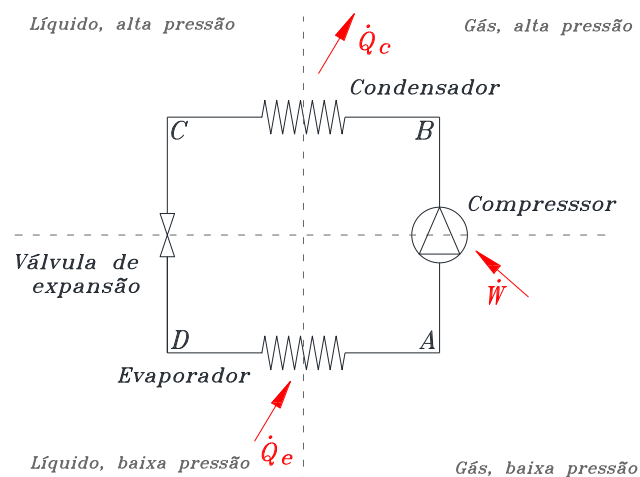


Figura II.1 – Componentes de um sistema frigorífico de compressão.

Foram traçadas duas retas tracejadas que dividem o sistema em quatro regiões distintas onde o fluido de trabalho se apresenta em diferentes estados. Nas regiões A e B, na parte acima

da reta horizontal o fluido encontra-se em alta pressão e na parte inferior o fluido está baixa pressão. Na parte à direita da reta vertical o fluido está na forma de gás (ou de vapor) e à esquerda dessa reta o fluido está na forma de líquido.

Esse sistema pode ser representado teoricamente pelo ciclo termodinâmico de refrigeração mostrado na Figura II.2, que está a seguir. Como é de costume, utiliza-se o gráfico pressão pela entalpia que permite uma visualização mais fácil dos fenômenos que estão envolvidos. Os pontos A até B indicados no esquema da figura anterior também estão marcados na figura do gráfico P x h.

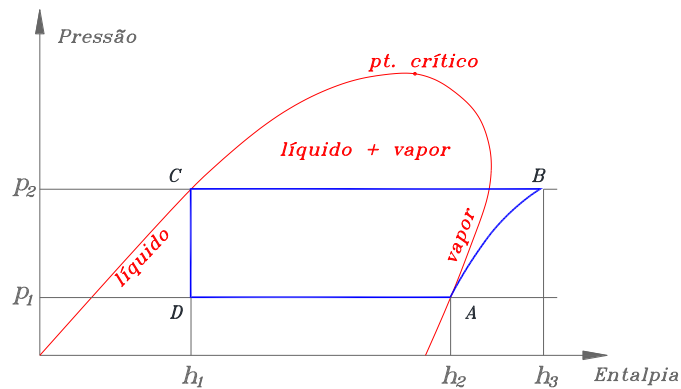


Figura II.2 – Ciclo de refrigeração teórico.

Esse ciclo de refrigeração é composto por quatro transformações termodinâmicas básicas. Inicialmente o fluido de trabalho na forma de um gás é submetido a uma compressão isentrópica entre os pontos A e B. Usando-se de uma fonte de energia externa, aumenta-se a sua pressão, e conseqüentemente, a temperatura também aumenta. Depois disso, sob pressão constante, entre os pontos B e C é feito o resfriamento e condensação. Isso é conseguido rejeitando-se o calor contido nesse fluido para um local que esteja em uma temperatura mais baixa, que quase sempre é o meio ambiente externo.

Após a condensação o fluido de trabalho se encontra sob a forma de líquido em alta pressão. Ele então é submetido a um processo especial de expansão passando de C para D, de forma que a pressão diminua e a entalpia permaneça constante. Assim, o fluido de trabalho transforma-se em uma mistura de líquido e vapor em baixa pressão e temperatura.

Entre os pontos D e A, também sob pressão constante, durante o processo de evaporação, a mistura de líquido e vapor vai se transformando em um gás. A energia usada para

essa mudança de estado é cedida pelo local ou pelo produto que se deseja resfriar. Esse gás então pode ser novamente comprimido e assim completa o ciclo.

Apesar de ser bem simples, a partir desse ciclo teórico podem ser determinados valores muito importantes para a caracterização e análise do sistema real que ele representa. Podem ser calculados, em termos específicos, os valores da energia que foi cedida ao fluido pela fonte fria e da energia que foi entregue pelo fluido para a fonte de temperatura mais alta. Por meio dessas calcula-se a energia externa que foi consumida. Além disso, também pode ser determinada a eficiência térmica do ciclo, dada pela relação entre a energia útil e a energia que foi consumida.

O ciclo termodinâmico que foi apresentado anteriormente utiliza um compressor para elevar a pressão do fluido refrigerante. Portanto, necessita de uma fonte externa de energia para o acionamento dessa máquina. Normalmente são usados motores elétricos ou acionamento com turbinas a gás ou a vapor.

Este ciclo também é utilizado nas máquinas frigoríficas de absorção. A única diferença entre esses dois tipos de equipamento está no modo em que se dá o aumento da pressão do fluido refrigerante. Nos equipamentos de absorção não se usa compressor, no lugar deste é usada uma bomba. Ou seja, não se comprime uma substância na forma vapor ou de gás, uma solução contendo essa substância é que é bombeada. Depois, usando uma fonte externa de calor, é feita a separação da substância refrigerante da solução absorvedora.

Essa é a característica dos equipamentos de absorção. Como fonte externa de energia os compressores usam o trabalho, já as máquinas de absorção usam o calor como fonte de energia. A Figura II.3 mostra que a diferença entre esses dois tipos de sistema está destacada em azul.

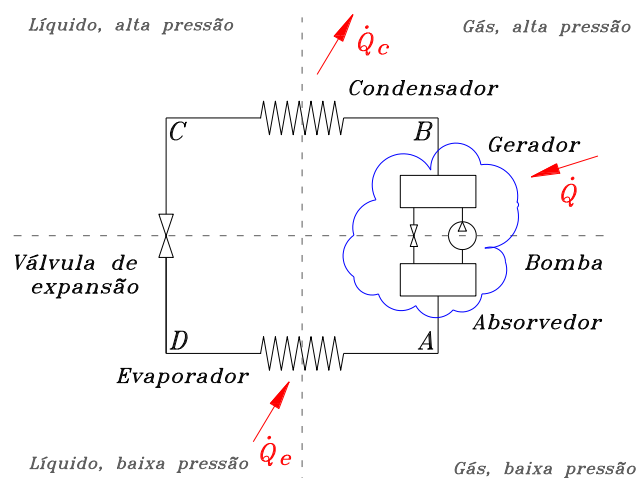


Figura II.3 – Componentes de um sistema frigorífico por absorção.



### II.1.3 - *Equipamentos empregados*

Sistemas de ar condicionado são construídos com o objetivo de manter um determinado espaço dentro de certas condições pré-estabelecidas de temperatura, umidade, distribuição e pureza. Essas condições dependem logicamente do uso que se pretende para esse espaço. Pode ser desde uma sala ultra limpa de um hospital, uma biblioteca com livros raros, o interior de uma indústria têxtil, um prédio de escritórios até um quarto simples ou a sala de uma residência.

Como cada um desses locais exige condições bastante distintas para o tratamento do ar existe uma diversidade muito grande de equipamentos e que foram desenvolvidos especificamente para cada tipo de aplicação.

Uma primeira classificação é feita separando-se os equipamentos em sistemas unitários e em sistemas centralizados. Os sistemas unitários são normalmente utilizados para cargas térmicas reduzidas e de menor responsabilidade, geralmente em residências e em ambientes pequenos. Já os equipamentos centralizados são empregados para os casos em que estão envolvidas cargas térmicas maiores, em recintos comerciais ou industriais e quando se exige um maior controle na distribuição e na qualidade do ar.

Os sistemas unitários são unidades compactas, montadas em fábrica e, quase sempre, instaladas próximas ao recinto a ser condicionado. Eles trazem incorporados serpentina de expansão direta para o resfriamento, controles, ventiladores, compressor e condensador resfriado a ar. Um exemplo desse tipo de equipamento são os aparelhos portáteis de janela. Um outro tipo de sistema unitário e que está sendo muito popularizado são os equipamentos conhecidos como *split*, isto é, aqueles que a serpentina e o ventilador são instalados no interior do recinto e o compressor e o condensador ficam separados e montados na parte externa, ou seja, o equipamento é dividido, por isso a razão da sua denominação.

Nas aplicações onde estão envolvidas maiores potências, que é o foco do presente trabalho, quase sempre são utilizadas unidades centralizadas de produção e distribuição de água gelada. Esse tipo de sistema faz a distribuição da energia de forma indireta e é a água que circula pela instalação fazendo o resfriamento de trocadores de calor instalados em vários pontos do edifício.

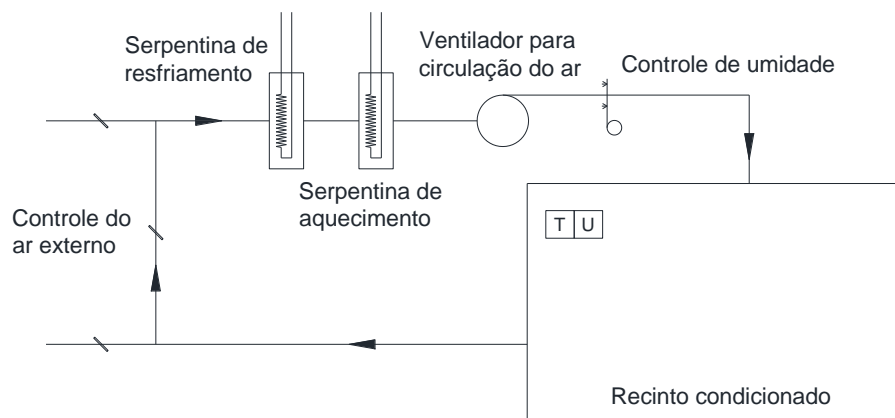


Figura II.4 – Sistema com distribuição de água a “4 tubos”.

Ou seja, usando água gelada que é bombeada através de conjuntos ventilador-serpentina, denominados de *fan-coil*, instalados nas áreas a serem climatizadas. Com isso é possível utilizar trocadores de calor mais baratos, compactos e de boa eficiência térmica, pois se consegue obter bons coeficientes de transferência de calor (STOECKER, 1985).

Nesse tipo de equipamento é muito comum que a água gelada seja bombeada para os conjuntos ventiladores-serpentinhas a uma temperatura em torno de 5°C e retorne com cerca de 12°C, valores estes que são impostos para garantir controle adequado das condições de temperatura e de umidade no interior dos recintos condicionados.

Uma vantagem ao se utilizar os sistemas de água gelada é que eles podem fazer um estoque de energia, ou melhor, um armazenamento térmico, na forma de gelo e ou mesmo de água gelada, e utilizar essa reserva durante os picos de demanda térmica. Assim a capacidade do equipamento pode ser definida para ficar mais próxima dos valores médios, atenuando as variações na demanda de energia para climatização.

## ***II.2 - Cogeração e Ar Condicionado***

Os sistemas de cogeração são, por definição, um conjunto de equipamentos que produzem simultaneamente energia mecânica e energia térmica útil. Esses sistemas se caracterizam pelo uso mais nobre e eficiente da energia que está presente nos combustíveis. Pois, devido às imposições da Termodinâmica, é impossível transformar o calor de uma fonte quente integralmente em trabalho mecânico. Uma parcela desse calor tem que ser rejeitada para

uma fonte de temperatura mais baixa. Desse modo, nos sistemas comuns sem cogeração se perde uma parte da energia do combustível e com isso o rendimento é mais baixo.

Já nos sistemas de cogeração, uma parcela da energia que seria perdida é reutilizada para fins de aquecimento e com isso os rendimentos alcançados são mais elevados.

Mas a cogeração não é nenhuma novidade tecnológica, pois desde a época de James Watt já se pensava nessa possibilidade (NOGUEIRA, 2012). Tanto é que no passado os sistemas de cogeração eram muito utilizados para geração de energia e de calor nas cidades e nas indústrias em geral. Com o desenvolvimento dos sistemas interligados e das grandes centrais eles se mostraram mais dispendiosos e com tempo foram sendo abandonados.

No entanto, com a primeira crise do petróleo eles retornaram a todo “vapor” e são utilizados com grande sucesso. Nessa ocasião diversos países criaram mecanismos para promover e incentivar a sua utilização. Em países com a Alemanha os sistemas de cogeração produzem cerca de 15% da energia elétrica consumida e na Holanda esse valor alcança mais de 52% do consumo de energia elétrica (COGEN EUROPE – 2013). Essa é a grande vantagem dos locais de clima mais frio, onde o calor rejeitado é usado no aquecimento distrital.

O Brasil também incentivou o uso dos sistemas de cogeração, facilitando a comercialização dos excedentes gerados e o acesso às redes de distribuição de energia elétrica. O setor do açúcar e do álcool que já possuía um longo histórico no uso da cogeração com vapor, está se modernizando e agora as antigas caldeiras estão sendo substituídas e passaram a operar em pressões mais elevadas melhorando muito eficiência das unidades. Além deste existem outros setores que empregam a cogeração com muito sucesso, entre eles podem ser citados pelo destaque, a indústria siderúrgica e de papel e celulose.

### II.2.1 - *Vantagens da cogeração*

Com a cogeração tem-se uma das formas mais inteligentes e racionais para a utilização dos combustíveis, conseguindo-se eficiências iguais ou até maiores que instalações operando em ciclo combinado.

Assim, sempre que a produção de energia de um local é feita em centrais termelétricas convencionais, normalmente é vantajoso usar a cogeração, pois os rendimentos alcançados são iguais ou superiores aos obtidos nas centrais termelétricas. Como a geração é feita localmente,





as perdas associadas aos sistemas de transmissão são inexistentes. Como principais vantagens dos sistemas de cogeração podem ser citadas:

- a) Permite a produção de energia elétrica com mais eficiência, economizando os combustíveis e preservando as reservas.
- b) A cogeração é ambientalmente mais correta e causa menores impactos;
- c) A geração se dá ao lado da carga, reduzindo investimentos na transmissão e as perdas;
- d) A produção da energia é feita de forma descentralizada com aumento da confiabilidade e redução do número de falhas;
- e) A cogeração aumenta a garantia do fornecimento da energia para o consumidor.
- f) Os projetos são de rápida implantação sendo muito adequados para a iniciativa privada;

### II.2.2 - *Resfriamento e climatização usando cogeração*

As baixas temperaturas podem ser obtidas a partir do calor rejeitado utilizando sistemas de refrigeração por absorção, como já foi mostrado anteriormente. O termo *trigeração*, um neologismo em nossa língua, significa exatamente isto, a produção conjunta de potência de eixo e energia térmica atendendo as demandas de aquecimento e de resfriamento.

Hoje os fabricantes têm disponível uma grande diversidade de equipamentos que foram especialmente desenvolvidos para aplicação em sistemas de trigeração, principalmente com motores de combustão interna. Os equipamentos disponíveis atendem uma faixa ampla de capacidades frigoríficas, desde algumas dezenas de kW chegando em até 10.000 kW.

Esse tipo de máquina tem como principal característica a ausência de peças móveis, exceto a bombas, pois eles são constituídos em sua maior parte por trocadores de calor. Por esse motivo a operação é silenciosa e sem vibrações.

As vantagens da utilização dos sistemas distritais para a produção de água gelada para climatização podem ser separadas em três: para os usuários, para o meio ambiente e para o país. (QATAR COOL – 2015). Para os usuários e clientes as principais vantagens são:

- O sistema é de 40% a 60% mais eficiente do que os sistemas convencionais.
- Apresenta custos operacionais substancialmente mais baixos, maior confiabilidade operacional e disponibilidade.
- Tem menores custos de construção, pois os sistemas de ar condicionado constituem tipicamente até 10% dos custos globais de construção.



- Apresentam menores custos de manutenção com os sistemas de ar condicionado, especialmente em grandes edifícios, que requerem manutenção profissional constante.
- Esse tipo de sistema proporciona uma melhora na qualidade e no controle de temperatura do ar que é distribuído para os ambientes condicionados, parâmetros que são normalmente difíceis de monitorar e regular, sobretudo se o sistema opera abaixo dos níveis ideais.

Quando se observam as vantagens ambientais podem ser destacadas:

- Como é um sistema com mais eficiência contribui para a redução das emissões dos gases de efeito estufa.
- Melhora a estética e dos ambientes locais eliminando o ruído e as vibrações.
- Contribui muito para a redução do consumo de energia, pois estima-se que o consumo de energia dos sistemas de ar condicionado possa atingir o pico de até 70% do consumo total de eletricidade durante os meses mais quentes.
- Auxilia na diminuição da poluição, já que os sistemas de ar condicionado estão sob crescente pressão para cumprir com o Protocolo de Montreal oferecendo uma rota alternativa para a redução do CFC.

Para o país podem ser destacados os seguintes benefícios:

- Os sistemas de distritais de climatização são reconhecidos como os um dos sistemas de maior potencial de sucesso imediato em termos de impacto sobre a oferta de energia elétrica.
- Como normalmente a energia elétrica é uma mercadoria que recebe subsídios, o impacto sobre a demanda é um impacto sobre os recursos nacionais.
- Como o gás natural é um recurso energético finito, quando usado em sistemas de cogeração tem alta eficiência e, por isso, deve fazer parte da estratégia nacional de conservação dos recursos.
- Como também se produz energia elétrica de forma distribuída, isso resulta em economia na construção de redes de transmissão e distribuição de energia, de subestações e de todos os periféricos associados.

### ***II.3 - Exemplos de Sistemas de Cogeração e Climatização***

Seguem alguns exemplos onde os sistemas de cogeração são utilizados com muito êxito na climatização. São mostradas duas aplicações fora do país, em Portugal e Japão, e mais três para o Brasil. A propósito, nos países mais desenvolvidos, o aquecimento distrital é muito



comum, principalmente para os que estão situados nas maiores latitudes. Já existe uma tradição no uso desse tipo de utilidades, por isso a distribuição de água gelada também está sendo cada vez mais usada.

Outros sistemas muito interessantes usados em climatização distrital também podem ser observados nas referências (EVER-GREEN ENERGY – 2015), (STELLAR ENERGY – 2015), e (TABREED – 2015).

### II.3.1 - *Parque das Nações*

A cogeração para a climatização é empregada com êxito no complexo denominado Parque das Nações, em Portugal. Em 1997, na cidade de Lisboa, um sistema de distribuição de água quente e gelada, foi construído para abastecimento dos edifícios que fazem parte do Parque das Nações, empreendimento que recebeu a Expo-98.

O sistema tem uma capacidade frigorífica de 26 MW e para o calor de 22 MW. O acionador utiliza turbinas movidas a gás natural gerando cerca de 4,7 MW. A central opera durante todo o ano gerando aproximadamente 40 GWh de eletricidade e mais 66 GWh de energia térmica. A área onde estão as instalações tem cerca de 330 ha e conta com mais de 80 km de redes de dutos para distribuição de água quente e gelada.

O empreendimento é gerido pelo grupo GDF Suez. No site da empresa constam informações de como fazer a contratação dos serviços e sobre as tarifas praticadas para a venda da energia (GDF, sd). As tarifas são compostas por uma parcela proporcional ao consumo, uma parcela que é proporcional à potência contratada, similar a demanda, e uma terceira parcela fixa para cobrir as despesas administrativas. Para o fornecimento de calor os valores em vigência durante o primeiro trimestre de 2015 são os seguintes:

|                             |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Consumo de água quente      | 0,06301 €/kWh       |
| Demanda de potência térmica | 1,49500 €/kW ao mês |
| Despesas de medição         | 6,16 € por mês      |

As tarifas para o consumo de água gelada seguem as mesmas regras.

|                             |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Consumo de água gelada      | 0,07270 €/kWh       |
| Demanda de potência térmica | 8,39000 €/kW ao mês |
| Despesas de medição         | 6,16 € por mês      |

Como era de se esperar, as tarifas de consumo para da água gelada são bem mais elevadas, aproximadamente 15% a mais no consumo e quase sete vezes mais para a demanda. A Figura II.5 mostra uma vista aérea desse local e a Figura II.6 apresenta um esquema da rede de dutos para distribuição da água quente e gelada.



Figura II.5 – Vista aérea do Parque das Nações (Google Earth).



Figura II.6 – Esquema da rede de distribuição água quente e gelada.

Apesar do sucesso desse empreendimento, depois de 2013, muitas empresas em Portugal paralisaram suas atividades de cogeração devido a mudanças no sistema de tarifas. Houve redução do preço da energia para algumas empresas, enquanto que em outras os valores são antigos, caracterizando um problema regulatório (COGENPORTUGAL, sd).

### II.3.2 - *DHC Shinjuku, Tokyo*

Um exemplo de porte é a planta de aquecimento e resfriamento distrital em Shinjuku, Tóquio com uma enorme concentração de arranha-céus. É uma das maiores instalações desse tipo em todo o mundo e foi colocada em operação em 1990 pela Tokyo Gas Co., Ltd. A capacidade total de refrigeração da planta é de 207.400 kW (59.000 TR) e inclui as três maiores unidades *chiller* do tipo centrífugo que já foram construídos.



a)



b)

Figura II.7 – a) Prédios em Shinjuku. b) *Chiller* de 10.000 TR.

Ela é composta por um sistema de cogeração composto por turbina a gás, caldeira de recuperação de alta pressão, turbinas a vapor de condensação e de contrapressão para o acionamento dos *chillers* centrífugos e produção de vapor de baixa pressão para as máquinas de absorção. A Figura II.8 (HITACHI, sd) mostra um esquema desses equipamentos.







Figura II.9 – a) Shopping Iguatemi. b) Motor utilizado na central.

### II.3.4 - *Edifício Rochaverá*

Localizado nas margens do Rio Pinheiros, em São Paulo, o Rochaverá Corporate Towers é um conjunto de quatro prédios corporativos ocupando um terreno com uma área de 37.000 m<sup>2</sup> e 120.000 m<sup>2</sup> de área construída. Para se ter uma ideia do tamanho do empreendimento, o Rochaverá está entre os quinze maiores contribuintes do IPTU da cidade de São Paulo.

Os prédios usam tecnologia para reduzir o consumo de energia, ar condicionado e água e possuem o certificado de sustentabilidade do US Green Building Council. Todos os quatro edifícios têm suas necessidades de eletricidade e de água gelada supridas integralmente através de uma central de cogeração a gás natural. É uma planta muito interessante se conhecer, pois são quatro grupos geradores totalizando 8,0 MW mais 7,5 MW em chillers de absorção e acessórios. Todos eles instalados no terceiro subsolo. A central de cogeração opera em paralelo com a rede da concessionária, pois os prédios abrigam data-centers de vários bancos e a energia tem que ser de qualidade e ininterrupta (COGEN, 2011).

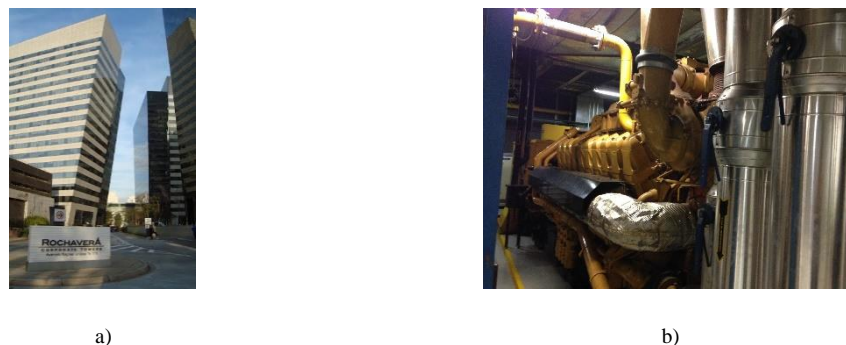


Figura II.10 – a) Entrada do Rochaverá. b) Um dos quatro motores da planta.

### II.3.5 - *Edifício Word Trade Center*

Nesse edifício ainda não opera com sistema de cogeração. Mas poderia. Esse prédio exemplo foi usado como exemplo justamente para ilustrar a oportunidade de se instalar esse tipo de equipamento em locais que já possuem motores geradores para emergência ou para o horário de ponta. São 5,3 MW em divididos em três geradores acionados por motores a gás. O suficiente para abastecer os 300 apartamentos de um hotel, um prédio de 25 andares do Bussines Tower e um Shopping Center. Como o investimento com os motores já foi feito, basta incluir a parte de recuperação de calor e da produção de água gelada (CUMMINS, 2010).



a)



b)

Figura II.11 – a) Fachada do WTC. b) Um dos três motores da planta.

## II.4 - *Trabalhos sobre Sistemas de Cogeração e Climatização*

Atualmente está disponibilizado um vasto acervo bibliográfico sobre os sistemas empregados para o aquecimento distrital. Isso se explica pelo uso, quase que obrigatório, dos mecanismos de calefação, extensamente utilizados nos países de clima mais frio. Por essa razão esses países também estão em um patamar bem mais adiantado no que se refere aos sistemas de climatização distrital.

A referência (IEA – 2011) publicou um trabalho bastante abrangente e que procura compreender as políticas e as barreiras para o uso da tecnologia de aquecimento e climatização distrital em países localizados fora do continente europeu. A mesma referência também apresenta estudos comparando o uso de aquecimento e climatização distrital para regiões densamente habitadas onde 80 a 90% dos imóveis usam o aquecimento e bairros de periferia onde a ocupação é bem menor com cerca de 10 a 15 % de uso de aquecimento (IEA – 2015).



Essa referência também publicou dois documentos (IEA – 1999) e (IEA – 2008) que contém muitas informações e dados de engenharia sobre a aplicação de materiais plásticos nas redes de distribuição de água para aquecimento e resfriamento. Além desses, a Agência Internacional de Energia, também mostra em sua página na internet uma lista com centenas de publicações, disponibilizadas de forma paga ou gratuita.

Ainda com relação ao desenvolvimento e pesquisas relacionadas com a aplicação de sistemas distritais de aquecimento e de resfriamento a (EREC – 2006) dentro do programa EcoHeatCool desenvolveu o estudo denominado “European Heating and Cooling Market Study” que tem como principal objetivo a divulgação de informações e em mostrar que esse uso, muitas vezes rotulado como uma tecnologia madura, pode de fato se expandir muito mais. Para isso foram elaborados estudos com as seguintes metas: analisar as demandas de aquecimento e resfriamento na Europa, com vista a fornecer informações abrangentes agregadas sobre todo o aquecimento e arrefecimento do mercado e sua dinâmica na Europa; encontrar novos locais e novas possibilidades para a implantação de centrais distritais de aquecimento e climatização; desenvolver ferramentas para avaliar a eficiência no uso da energia primária em sistemas distritais até a entrega da energia ao cliente final; avaliar e compartilhar as implicações do incremento de mais sistemas distritais em relação aos objetivos das políticas europeias quanto ao uso da energia e finalmente fornecer subsídios e recomendações para estratégias que possam incentivar o desenvolvimento de calor sustentável e novas opções de fornecimento de energia para a climatização.

Fazendo parte da área de desenvolvimento e disseminação de conhecimento e ainda dentro do âmbito do programa EcoHeatCool a referência (EUROHEAT – 2012) lançou a plataforma DHC Plus Technology Platform com a publicação de vários trabalhos incluindo o estudo denominado “The Vision for District Heating & Cooling” que contém a projeção de cenários para os anos de 2020, 2030 e 2050.

Os países nórdicos, em função do clima tem muita tradição no uso de sistemas distritais de aquecimento. Uma grande variedade de artigos técnicos e notícias sobre aquecimento e climatização distrital também estão mostrados na referência (DBDH – 2015) onde encontram-se estudos de caso, tecnologia e materiais empregados na distribuição de água quente e gelada nos distritos implantados em Estocolmo e em diversas cidades da Dinamarca. Outras informações também podem ser encontradas em (FINNISH - 2015) que apresenta os mesmos aspectos e diversas estatísticas para a Finlândia e na (SDHA - 2015) que contém dados e aplicações dessa tecnologia na Suécia.

Também foi efetuada uma busca na Internet, foi utilizado o mecanismo de buscas Sciencedirect. A mesma foi efetuada buscando artigos que tratassem de assuntos correlatos ao tema do presente trabalho. As palavras-chave “*District Heating*” retornou mais de onze mil documentos. Já para o conjunto de palavras “*District Heating and Cooling*” o número de respostas foi bem menor, como era de se esperar, foram encontrados cerca de mil documentos. Quando se faz uma busca combinada dos termos “*District Cooling*” e “*GIS*” os resultados alcançados são muito menores, foram listados apenas trinta e três documentos e artigos técnicos mostrando que o tema do presente trabalho é algo relativamente novo e ainda muito pouco explorado.

## ***II.5 - Sistemas de Informação Geográfica***

O termo Sistema de Informações Geográficas – SIG pode ser aplicado para sistemas capazes de realizar tratamento computacional de dados geográficos, extraindo informações não apenas das características alfanuméricas dos dados, mas também considerando a localização espacial (Câmara e Queiroz 2001) A princípio, poderia pensar que um SIG só passou a existir com o advento do computador, mas observa-se que tais sistemas já existiam bem antes do surgimento do primeiro computador e os SIGs evoluíram a partir de séculos de produções de mapas e da compilação de registros geográficos. Os romanos já empregavam o conceito de registro de propriedades, no *capitum registra* (registro de terra) e em muitos países o termo cadastro designa o registro de mapas e propriedades (Miranda 2005).

Assim, pode-se definir um ambiente SIG atual como aquele que tem componentes de informática, módulos de programas de aplicação e recursos humanos. Como componentes de informática destaca-se os equipamentos de entrada como GPS, mesas digitalizadoras; equipamentos para processamento, neste caso os computadores; e equipamentos de saída são impressoras e monitores. Os módulos de programas de aplicação são softwares e aplicações implementadas em ambiente computacional para tratamento e análise dos dados espaciais, gerando produtos como mapas, planilhas, gráficas e outros tipos de informação. Já o recurso humano é responsável por definir projetos, implementar, usar e prestar assistência ao SIG o que demanda pessoas treinadas e conhecedoras das funcionalidades do sistema.

Para este trabalho a maior ênfase se dá aos softwares e a aplicações implementadas em ambiente computacional, utilizados para tratamento e análise das informações geográficas para gerar os produtos desejados. Existem diversos softwares SIG disponíveis, pagos ou gratuitos,



com destaque para o QuantunGis que foi utilizado nas análises e tratamento de dados espaciais deste trabalho.

A representação espacial dos dados nestes softwares pode ser feita basicamente de duas formas. Por arquivos no formato matricial (*raster*), que são formados por uma matriz de pixels (ou células), de dimensões definidas, em que cada pixel possui um único valor numérico que representa uma condição da área coberta por essa célula, por exemplo a topografia de uma determinada região pode ser representada por um arquivo *raster* em que cada pixel possui um valor de cota correspondente a cota média para a área daquele pixel. A dimensão dos pixels é denominada resolução espacial, e indica o valor do comprimento das arestas dos pixels. O modelo matricial apresenta certos problemas, como restrições decorrentes de uma representação discreta das informações espaciais e certa imprecisão na representação dos limites de feições geográficas. A representação vetorial surge como solução a estes dois problemas em que as informações são representadas por elementos com sua própria geometria de pontos, linhas e polígonos, permitindo que todas as posições, comprimentos e dimensões possam ser definidas exatamente. Além disso, outras informações podem ser associadas a cada elemento vetorial, na forma de atributos de ponto.

## ***II.6 - Análise Resumida da Legislação***

No Brasil, um país que preza a burocracia, os projetos de geração de energia têm que cumprir um ritual jurídico um tanto complexo. Devem atender uma lista de exigências cartoriais e licenças de todo tipo. Além disso, depois tem que cumprir a legislação tributária, que muda constantemente. Muitas vezes isso afasta os investidores e empreendedores. No caso de uma central de cogeração que pratica a venda do excedente de energia elétrica, essa parte envolve a esfera Federal. Lida também com a legislação Estadual, porque a distribuição e uso de gás natural foi assim delegada e finalmente tem que se adequar e obedecer às leis do Município no que se refere ao uso e ocupação do solo, ainda mais que deverão ser abertas, galerias e passagens para dutos nas vias públicas e até em terrenos de terceiros.

Não temos a pretensão de nos aprofundar nesse assunto. Mas devido à relevância de algumas leis elas são brevemente comentadas a seguir.



## II.6.1 - Cogeração

O quadro institucional reconhece a cogeração, embora a Lei 9074 de 1995 se refira a vapor, ao invés de calor. O Decreto 2003 de 1996 corrige este equívoco:

*Art. 23. O produtor independente poderá comercializar a potência e/ou energia com:*

*(...)*

*III - consumidores de energia elétrica integrantes de complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração;*

O referido decreto não estabelece restrições quanto às características do consumidor (consumidores livres ou especiais, por exemplo), e amplia o conceito de entrega de vapor (ou outro insumo oriundo do processo de cogeração), alcançando a distribuição de água gelada.

A Resolução Normativa 235 de 2006, da ANEEL, estabelece os requisitos para qualificação de centrais termelétricas cogedoras de energia, e, seguindo a tendência mundial, avalia somente a eficiência energética da planta, deixando de considerar o efeito positivo sobre o sistema de distribuição ao qual se conecta a central.

Com relação aos aspectos operativos das centrais de cogeração, o Decreto 2003 de 1996 define, de forma ampla, as modalidades operativas como integrada ou não integrada:

*Art. 14. A operação energética das centrais geradoras de produtor independente e de autoprodutor poderá ser feita na modalidade integrada ou não integrada.*

*§ 1º Considera-se operação integrada ao sistema aquela em que as regras operativas buscam assegurar a otimização dos recursos eletroenergéticos existentes e futuros.*

*(...)*

O conceito de operação integrada apresentado condiz com o que se pretende, em princípio, para a cogeração caracterizada como geração distribuída, quando ocorrer impacto positivo sobre o sistema elétrico. A operação integrada da cogeração distribuída poderia trazer benefícios à rede de distribuição local e a todo o sistema, caracterizando uma prestação de serviços ancilares à concessionária de distribuição local. Na legislação atual, os procedimentos para prestação de serviços ancilares de geração e distribuição são definidas pela ANEEL na

Resolução Normativa 265 de 2003, porém tal resolução foca o sistema elétrico acima da distribuição. Os benefícios da geração distribuída, notadamente dentro de centro densamente urbanizado, como geração de reativo, redução de perdas, investimento evitado e melhor confiabilidade/segurança, não são considerados na legislação vigente.

O PRODIST da ANEEL permitiria, se plenamente aplicado, considerar a geração distribuída como sendo uma parte integrante do sistema de distribuição, permitindo que a empresa distribuidora incorpore sua capacidade para fins de expansão, atendendo os padrões regulatórios de fornecimento.

Internacionalmente, nos países desenvolvidos a cogeração qualificada é reconhecida e incentivada, notadamente aquela de pequena escala. Os incentivos são baseados no princípio da eficiência energética.

## II.6.2 - *Comercialização de Energia Elétrica*

Os regulamentos da ANEEL (Resolução Normativa 414 de 2010) são muito restritivos à venda de energia a consumidores individuais dentro de mesma edificação, pois impõe que, para se ter cogeração intramuros, a edificação seja de único dono, alugando espaços a terceiros, incluindo nesses custos o calor e a eletricidade. Este é um ponto de mudança fundamental, pois dificulta a venda combinada de energia elétrica e calor de forma combinada, exigindo artifícios institucionais. É importante dizer que a lei 9074 e o decreto 2003 preveem esta possibilidade, em contradição com a regulamentação da ANEEL.

Outra restrição imposta ao segmento de cogeração encontra-se no impedimento da comercialização de energia proveniente de cogeração a consumidores especiais (Resolução ANEEL 247 de 2006), pois, independentemente de o empreendimento possuir cogeração qualificada ou não, a resolução não o classifica como agente gerador incentivado

A comercialização de energia elétrica, proveniente de empreendimentos de geração distribuída, a distribuidoras é regulamentada pelo Decreto 5163 de 2004 e pela Resolução 167 de 2005, que estabelecem que a contratação deve ocorrer por processo de chamada pública de contratação e não deve exceder dez por cento da carga do agente de distribuição. Desta regulação, destaca-se: “A ANEEL autorizará o repasse, às tarifas dos consumidores finais, do preço da energia elétrica adquirida (...) até o limite do Valor Anual de Referência – VR” (Resolução 167 de 2005)”. Porém o VR, que é calculado considerando os montantes

contratados e os valores médios de aquisição praticados nos leilões, não é adequado a geração distribuída, pois, enquanto os valores de leilões regulados são referenciados ao centro de carga do sistema, a geração distribuída (com destaque para a cogeração com sistemas de absorção, foco deste trabalho) se encontra embebida em uma grande carga (a metrópole). Além das vantagens evidentes de deslocamento de investimentos em transporte e redução de perdas elétricas, esta geração pode prover o sistema de serviços ancilares, como geração de reativo, além de melhorar a confiabilidade em área tão vulnerável

Para a cogeração, o VR estabelecido como preço teto de contratação pelas distribuidoras e o próprio procedimento licitatório merecem mais atenção e melhor regulação, como a definição do benefício total da cogeração sobre o sistema local e a imposição de condicionantes geográficas.

### II.6.3 - *Incentivos para Cogeração*

Conforme estabelecido na Lei 9427 de 1996 e na Resolução 77 de 2004, a cogeração não se beneficia de todas as vantagens da geração oriunda de fonte renovável. É concedida ao empreendimento caracterizado como cogeração qualificada (respeitado o limite de potência injetada na rede de 30 MW) a redução de 50% (cinquenta por cento) da tarifa do uso dos sistemas de distribuição (TUSD), representando a maior, e quase única, vantagem da classificação como cogeração qualificada.

As condições estabelecidas na Resolução 482 de 2012, para o acesso de micro e da mini geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e para o sistema de compensação de energia elétrica, incluem a cogeração qualificada, porém a limitação da potência instalada restringe o parque candidato.

Destaca-se o fato que nunca houve um instrumento que obriga a compra de energia oriunda de cogeração qualificada, à semelhança do PROINFA para as gerações oriundas de biomassa, PCH e eólica. Assim como foi para essas fontes, uma ferramenta equivalente de alavancagem de mercado promoveria uma redução de custos de investimentos.

Mesmo não sendo, propriamente cogeração e uma medida de caráter provisório, merece muito destaque a Portaria 44 do Ministério de Minas e Energia, de março de 2015, que permitiu a exportação de energia por geração própria, com valores de comercialização atraentes.

## II.6.4 - *Gás Natural*

### **Estrutura do mercado**

De forma geral, a legislação federal é recente e ainda não se tem experiências significativas. Em tese, as figuras institucionais necessárias estão presentes na legislação, mas não há sinais de que o mercado competitivo venha a se formar no médio prazo, dada a existência de um agente com poder de mercado desproporcional.

Em princípio, as Leis Federais e as Lei do Estado de São Paulo atendem aos requisitos dessa questão, pois definem a figura do usuário livre, do auto-importador, do comercializador, dos agentes de transporte e distribuição. Estabelecem, ainda, o direito ao uso do sistema de distribuição, ao acesso aos gasodutos, as diretrizes para a prática da comercialização do gás natural, entre outros (Lei 11909/09 e Decreto 7382/10).

### **Preços**

No cenário atual, o questionamento está concentrado nos preços, face ao poder de mercado da Petrobras. O preço do gás elevado poderia ser um incentivo à importação, mas o monopólio das instalações físicas é uma clara barreira.

A possibilidade de se ter preços diferenciados para geração termelétrica eficiente, como a cogeração, até mesmo com igualdade de condições às térmicas do Programa Prioritário de Termelétricas – PPT, seria capaz de dar competitividade para o setor. Entretanto, não parece haver espaço institucional para tal. Isto inclusive vai contra a prática internacional, na qual se observam preços de mercado, embora haja muitas exceções no país. Os incentivos deveriam ser dados através de tributação diferenciada.

Com relação à distribuição, o quadro tarifário das empresas paulistas de gás prevê incentivos para a cogeração, em especial a pequena cogeração (Portaria CSPE 139 de 2001), estabelecendo também tarifas diferenciadas aplicadas aos segmentos de termelétricas, cogeração e refrigeração.

### **Transporte de Gás Natural**

O modelo estabelecido para a expansão dos gasodutos de transporte, através de concessões, pode não trazer ao mercado a dinâmica necessária para este projeto, no horizonte

de médio prazo. A previsão de possível uso de recursos federais para a construção desses gasodutos pode ser a forma de se iniciar a expansão da rede, vendendo capacidade aos carregadores. O transporte alternativo (notadamente sobre rodas) pode ser uma solução para o amadurecimento do mercado, principalmente com as evoluções tecnológicas do GNL.

Com relação à distribuição, a área que é foco deste trabalho já está sujeita ao livre acesso. O que se percebe é a falta de gás para utilizar essa capacidade, conforme já comentado. Também há a necessidade de uma política de expansão da malha urbana, notadamente para atender a pequena cogeração.

## **Comercialização de Gás Natural**

O mercado de gás é incipiente, tendo em vista a presença de um agente notadamente desproporcional. Não há sinais de curto prazo de que isto venha se alterar. Uma forma de se iniciar um mercado mais dinâmico seria criando um mercado secundário forte. Entretanto, a forma do mercado hoje existente é também centrada na Petrobras, através de venda de gás interruptível, oriundo, em sua maioria, da forma de operação das centrais termelétricas. Uma mudança no critério operativo dessas centrais pode afetar sobremaneira este mercado, firmando a oferta de gás. A atividade de comercialização é quase livre em São Paulo, pois existe impedimento da comercialização para os segmentos comercial e de serviços, e segue a mesma linha do setor elétrico, o que é prejudicial ao desenvolvimento do setor.

### **II.6.5 - *Eficiência Energética***

Em todos os setores energéticos, há previsão legal para incentivos à eficiência energética (leis federais 9478/97 e 9074/95 e lei estadual paulista 11909/2009). Entretanto, diferentemente da realidade europeia, na qual o eixo dos incentivos à cogeração se assenta, exatamente, no princípio de eficiência energética, não há nenhum incentivo específico para ações de eficiência que seja aplicável à cogeração.

Tampouco a lei federal 10.295/2001, conhecida como lei de eficiência energética, tem previsão de instrumentos de incentivo ou de coerção à produção combinada de calor e eletricidade. Esta lei foca seus instrumentos à eficiência energética de equipamentos e não de sistemas, como seria a cogeração. De forma superficial, se refere à eficiência em edificações, o que poderia abrir espaço para a visão integrada “edificação/suprimento energético”, e daí



promover os sistemas combinados de eletricidade e calor. Tendo em vista a abrangência maior dos sistemas de distribuição de água gelada a partir da cogeração, entende-se que a lei 10.295 não é suficiente para sua promoção efetiva.

### II.6.6 - *Uso de bens públicos municipais*

Conforme a constituição federal, o solo urbano, excetuando-se as riquezas nele contido, pertence ao município. Segundo a Lei Orgânica da Cidade de São Paulo, os bens municipais podem receber outorga de uso na forma de autorização, permissão ou concessão. Quando ocorre o caso de uso de vias públicas, o instrumento previsto mais comum é a permissão, conforme a lei municipal nº 13.614/2003:

*“(...) fica delegada à Secretaria de Infraestrutura Urbana, a competência para outorgar às pessoas jurídicas de direito público e privado a permissão de uso, a título precário e oneroso, das vias públicas municipais, incluindo os respectivos subsolos”*

Casos precedentes de uso do subsolo municipal por particulares são predominantemente outorgados através de permissão, como na interligação de edifícios (Decreto municipal 35.809) e passagens subterrâneas (Decreto municipal 47.510). Estas permissões, conforme a Lei Nº 13.614/2003, são precárias e onerosas, o que é desfavorável ao caso em estudo, considerando o investimento elevado nas estruturas de distribuição de calor. Estruturas de maior vulto, para fins de serviço público, como estacionamentos subterrâneos, têm sido outorgadas através de concessão, como dispõe a Lei 13.688/2003:

*“Dispõe sobre concessão de serviço público, (...) para construção de garagens subterrâneas e exploração de serviço de estacionamento de veículos, em áreas situadas nos Distritos da Sé e República, e no Parque Ibirapuera”.*

À semelhança deste caso, poderia se ter concessões de áreas para a exploração de produção e distribuição de água quente e gelada para a climatização, tendo em vista o interesse público em se ter melhor e mais segura infraestrutura urbana.

### **Galerias técnicas**

Visando a modernização dos equipamentos urbanos, em mais de uma lei municipal é incentivada a implantação de galerias técnicas pelas operadoras de serviços de interesse

público, como distribuição de energia elétrica e gás. Segundo o Decreto nº 44.755/2004, galeria técnica é o:

*“(...) equipamento instalado no subsolo, destinado a abrigar equipamentos de infraestrutura urbana de maneira ordenada, podendo abranger diferentes modalidades de serviços, dependendo de suas características”.*

A Lei municipal Nº 13.614/2003 prevê a *“(...) implantação de galerias técnicas e obras compartilhadas”*. De forma semelhante, o Plano Diretor Estratégico considera importante a *“Viabilização das instalações da rede elétrica e de iluminação pública em galerias técnicas no subsolo urbano”*. Além disso, a obrigatoriedade de tornar subterrâneo todo cabeamento no município de São Paulo é dada pela Lei Nº 14.023/2005 e Decreto Nº 47.817/2006, o que mostra o posicionamento favorável do poder público com relação ao estabelecimento de estruturas dessa natureza.

Assim, a distribuição de água quente e gelada por galerias técnicas compartilhadas já encontra respaldo no quadro legal municipal, o que favorece a implementação dos distritos de cogeração para climatização.

### **Política pública de distribuição de água quente e gelada**

Não há previsão legal municipal específica para essa distribuição, embora haja os requisitos básicos para tal, como a promoção da eficiência energética. Uma política específica poderia se basear na simples autorização de uso de áreas públicas, ou na concessão de áreas para instalação das plantas geradoras e para a distribuição de água quente e gelada. A concessão de um serviço público de aquecimento/resfriamento distrital implicaria em sistemas de regulação e tarifação bastante complexos, e não refletiriam a melhor prática internacional, que busca dar mais liberdade a esses sistemas, tendo em vista a relativa competição com outras formas de aquecimento/resfriamento, que, por si só, promove a eficiência econômica.

#### **II.6.7 - Meio ambiente**

A questão legislativa ambiental municipal influi neste projeto principalmente com relação à emissão de poluentes atmosféricos. A Lei Nº 14.933/2009, que institui a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo destaca a importância da *“promoção e adoção de programas de eficiência energética e energias renováveis em edificações, indústrias e*



*transportes*”, bem como estabelece que “*As edificações novas a serem construídas no Município deverão obedecer critérios de eficiência energética*”. Assim como as legislações estadual e federal, não há instrumentos efetivos que pudessem ser usados na promoção da cogeração urbana acoplada a sistemas de climatização distrital.

O Decreto municipal nº 52.209/2011 dispõe sobre a conversão de grupos motogeradores a óleo para equipamentos menos poluentes, o que abre campo para a utilização de gás natural como combustível. Entretanto, esta questão também deve ser tomada à luz dos Decretos Estaduais 50.753/06 e 52.469/07 (Decretos de Bacias Aéreas), em função do município de São Paulo se encontrar em nível saturado ou próximo de saturado de poluentes. Uma ampla expansão da cogeração a gás, mesmo considerando a baixa ou nula emissão de particulados e de óxidos de enxofre, pode ter restrições pelos óxidos de nitrogênio. Caso assim seja, adaptações da legislação ambiental municipal seriam exigidas.

A lei estadual 13.798/2009 criou a Política Estadual de Mudanças Climáticas-PEMC, estabelecendo metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Essas metas criam limites para essas emissões regulamentando a instalação de centrais termelétricas no território paulista. Por outro lado, a lei é específica ao tratar da promoção da eficiência energética, o que condiz com a distribuição de água quente e gelada oriundo da cogeração.

## Capítulo III - METODOLOGIA DO TRABALHO

Apresenta-se a seguir a metodologia que foi desenvolvida para esse trabalho. Para facilitar a compreensão ela foi dividida em três etapas. Essas etapas podem ser utilizadas em sequência, de forma conjunta, ou então separadamente, de acordo com os resultados que são desejados e conforme a disponibilidade das informações que são necessárias.

A primeira dessas etapas trata da localização geográfica das principais cargas térmicas de ar condicionado em uma determinada região, que pode se tratar de uma cidade inteira, alguns bairros ou uma parte de um grande aglomerado urbano. Nessa etapa são utilizadas ferramentas do tipo Sistemas de Informação Geográfica – SIG ou então bancos de dados que permitam o georreferenciamento e classificação das cargas de resfriamento. Na etapa seguinte, usando-se SIG é feita a seleção dos locais mais adequados para a implantação das centrais de cogeração para atender aquelas cargas térmicas que foram determinadas na etapa anterior. Na terceira etapa, por meio da modelagem dos equipamentos são desenvolvidos os cálculos energéticos para avaliar a viabilidade econômica da implantação dessas centrais.

A Figura III.1 apresenta essas etapas mostrando de forma esquemática as fontes de dados e informações, as ferramentas e os produtos resultantes finais.

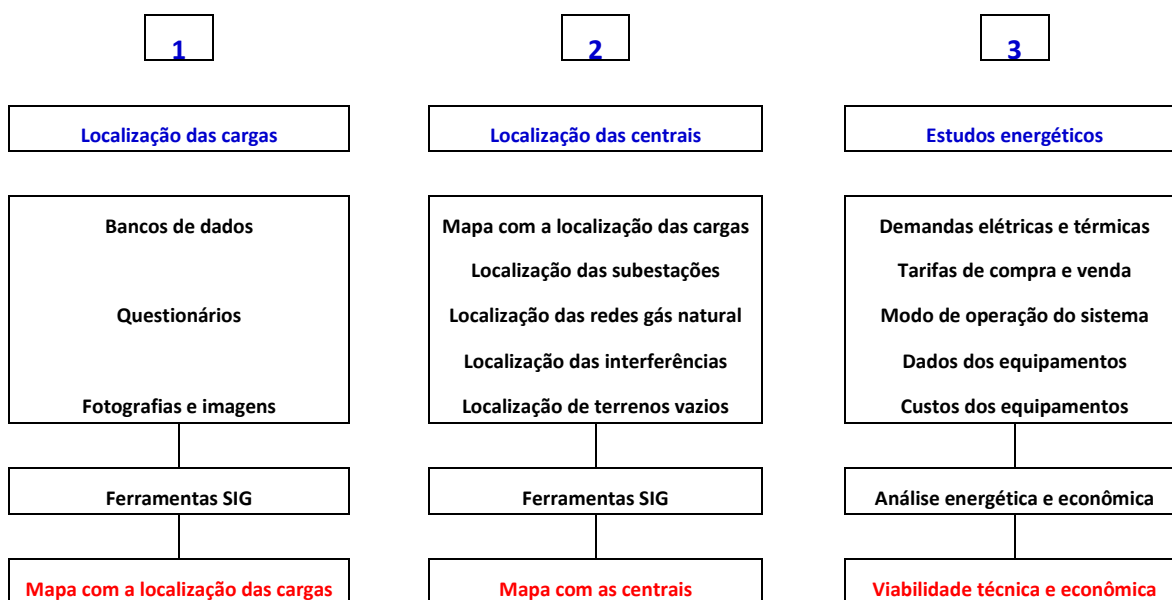


Figura III.1 - Divisão da metodologia empregada nesse trabalho.

### ***III.1 - Localização das cargas de resfriamento***

O primeiro passo depois que a cidade ou a região selecionada para o estudo foi fixada é a estimativa e a localização das cargas térmicas que possam ser substituídas por sistemas de cogeração com máquinas de absorção. Isso pode ser feito de diversas maneiras. Um processo simples e direto seriam visitas em cada prédio ou edifício. Dessa forma a instalação de ar condicionado existente seria bem conhecida e a carga térmica poderia ser estimada através da potência instalada, sendo esta, por sua vez, determinada verificando-se os dados de placa dos equipamentos existentes. A localização pode ser determinada a partir do endereço do local ou obtendo-se as coordenadas usando um aparelho do tipo GPS.

Esse processo, apesar de ser muito mais detalhado e possibilitar o acesso a várias outras informações, demandaria muito tempo e seria por demais oneroso. Além disso, o acesso até as máquinas normalmente é complicado ou restrito, as placas de identificação estão ilegíveis ou então desapareceram. Há também um inconveniente nessa abordagem: sempre existe a dúvida se o equipamento de ar condicionado existente no local foi bem dimensionado, ou seja, se ele é adequado para atender a carga térmica do local.

Assim, é importante facilitar e acelerar esse processo de busca e localização utilizando outras ferramentas. Por isso, nesse trabalho foram abordados três modos diferentes para fazer essa localização das cargas de climatização.

- a) A partir do cruzamento de diferentes bases de dados
- b) Por meio de questionários enviados para setores selecionados
- c) Através de estimativas usando imagens aéreas e fotografias.

Esses três modos são melhor explicados e detalhados a seguir.

#### ***III.1.1 - Cruzamento de bancos de dados***

Ele consiste em reunir as informações existentes no banco de dados da concessionária de energia elétrica com as informações do cadastro de imóveis da prefeitura. Com a concessionária de energia pode-se obter uma listagem com a identificação, a localização espacial e o consumo de energia dos clientes consumidores de energia de uma determinada cidade ou de uma região de interesse. Essas informações podem ser depois relacionadas com os dados da prefeitura obtendo elementos sobre o tipo de imóvel, a finalidade do uso, a

ocupação e a área útil de cada um deles. Isso está mostrado de forma esquemática na Figura III.2.

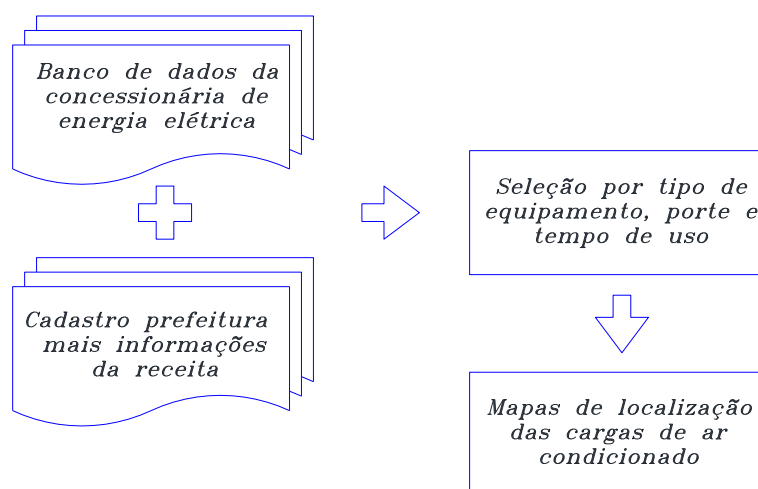


Figura III.2 – Localização das cargas usando bancos de dados.

Como o tipo de imóvel, a sua finalidade, a sua área e tempo de ocupação são dados conhecidos, podem ser então adotados valores típicos de consumo de energia elétrica para cada um dos usos e tipos de imóveis. Dessa forma é possível estimar, em termos médios, qual seria o consumo mensal de um determinado imóvel.

De forma semelhante ao que foi feito com a energia elétrica, pode-se usar índices de carga térmica por área, também podendo-se estimar o consumo de energia somente para o ar condicionado.

O valor resultante da soma desses dois consumos pode então ser comparado com o consumo real de energia observado pela concessionária. O resultado obtido com essa comparação pode ser enquadrado em um dos três seguintes casos:

- a) O valor estimado de consumo é da mesma ordem de grandeza que o valor real observado. Isso significa que o imóvel considerado se enquadra dentro dos padrões médios de consumo.
- b) Quando o valor consumo estimado estiver muito acima do valor real observado medido pode-se inferir que os existentes no imóvel operam de forma ineficiente.
- c) Em caso contrário, quando o valor do consumo estimado estiver muito abaixo do consumo real isso pode significar que no imóvel não existe sistema de condicionamento ambiental ou então o mesmo é pouco utilizado.



Nos dois primeiros casos pode-se supor que já existe um montante de energia que é consumido pelos sistemas de ar condicionado. Para o terceiro caso, é a situação em que se projeta para esse imóvel um futuro consumo de energia em sistemas de ar condicionado com a instalação de novos equipamentos ou então com o uso mais intensivo dos sistemas existentes.

Assim, esse processo resultaria em um mapa com a localização dos imóveis e com uma estimativa bastante razoável para o consumo energético em ar condicionado.

Outra informação que pode obtida através dos bancos de dados é a idade do imóvel e a partir disso avaliar a idade do equipamento de ar condicionado. Caso isso não seja possível é bastante razoável supor é que os equipamentos os instalados nesses sistemas de ar condicionado acompanhem uma distribuição estatística típica em relação a sua idade e vida útil.

Assim sendo, por esse processo é possível avaliar para uma determinada região, a quantidade e a potência dos equipamentos de ar condicionado que podem ser substituídos em razão da proximidade do fim da vida útil ou porque estão obsoletos, com baixa eficiência e por isso apresentam um consumo energético muito elevado.

No entanto, o cruzamento de bancos de dados exige o livre acesso a esses bancos de informações da concessionária de energia e da prefeitura e nem sempre eles estão disponíveis para consultas públicas e mesmo quando disponíveis, não estão atualizados ou são incompatíveis entre si.

Por todos esses motivos essa alternativa para a localização das cargas para ar condicionado não foi utilizada, mesmo considerando que esta alternativa seria de aplicação mais rápida, de menor custo e com resultados mais confiáveis e precisos.

### III.1.2 - *Envio de questionários*

A localização dos principais pontos de demanda de energia elétrica para ar condicionado também pode ser realizada por meio do envio de questionários para os proprietários ou responsáveis pelos imóveis situados dentro de uma determinada região de interesse. Esse tipo de processo é indicado quando existe um tipo específico de cliente ou setor que está sendo analisado. Nesse caso, os contatos podem ser simplificados e a quantidade de respostas mais efetiva quando ele é feito através das entidades de representação de classe ou dos sindicatos de empresas.



A principal vantagem desse modo de localização de cargas de resfriamento é a rapidez e facilidade de execução e o baixo custo. Como desvantagens destacam-se as resistências para fornecer ou enviar as respostas e a qualidade e a confiabilidade das respostas desse questionário, pois algumas delas exigem algum conhecimento técnico.

Na elaboração desse trabalho diversas informações foram extraídas de um questionário desse tipo. Trata-se do “Levantamento de Ar Condicionado”, realizado em 2009 pela Companhia de Gás de São Paulo – Comgás. Ele contém a dados de compilados de muitos questionários que foram aplicados pela empresa administradora de imóveis Cushman & Wakefield.

Esse levantamento foi realizado em uma parte significativa da área metropolitana da cidade de São Paulo. O levantamento foi realizado em quatorze regiões, selecionadas justamente por causa da existência de um número expressivo de prédios comerciais e de escritórios ou então pela aptidão futura para a imóveis desse tipo. Essas regiões somam uma área de aproximadamente 7.350 ha, como pode ser verificado na Figura III.3 que mostras essas áreas sobre uma imagem do Google Earth.

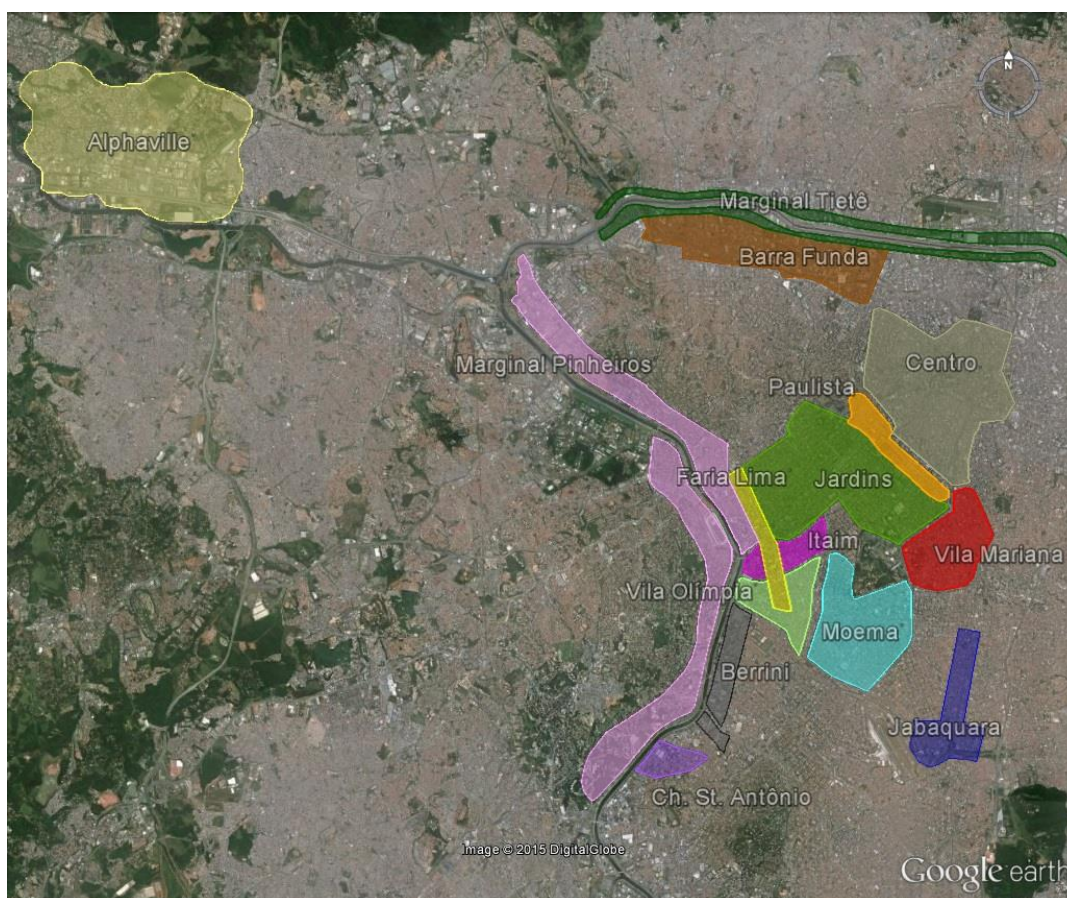


Figura III.3 – Regiões que foram pesquisadas.



Nesse levantamento foram apresentadas dezenas de questões, incluindo desde aspectos administrativos até os detalhes técnicos e operacionais, com perguntas sobre o tipo de equipamento de ar condicionado empregado, tempos de operação dos equipamentos, a área útil atendida, a idade do maquinário, se haviam problemas de manutenção, etc.

Foram aplicados questionários em cerca de 1100 imóveis consumidores de energia elétrica e ar condicionado. O objetivo principal da pesquisa era os prédios de escritório, mas alguns hospitais e os centros comerciais também foram pesquisados. Do total que foi enviado, foram respondidos 958 questionários. A distribuição dos tipos de imóveis está na mostrada de forma agregada no gráfico da Figura III.4.

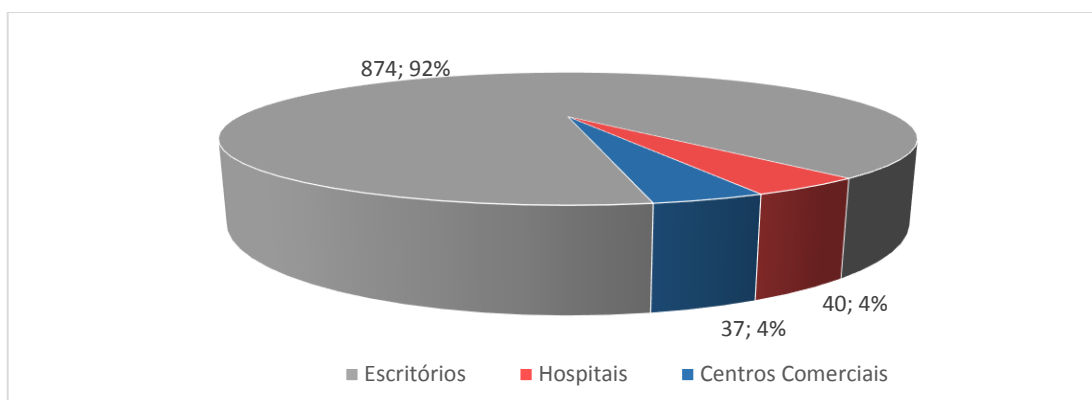


Figura III.4 – Distribuição dos tipos de imóveis na amostra total.

A Figura III.5 mostra, como um exemplo, os imóveis pesquisados que estão localizados ao longo da Avenida Brig. Faria Lima, uma das 14 regiões que foram analisadas. Observa-se nessa figura que nessa região existem escritórios do tipo A, B e um centro comercial. Os escritórios do tipo A são aqueles de padrão mais elevado, geralmente possuem heliporto e outras comodidades. Nessa região não foram pesquisados hospitais.

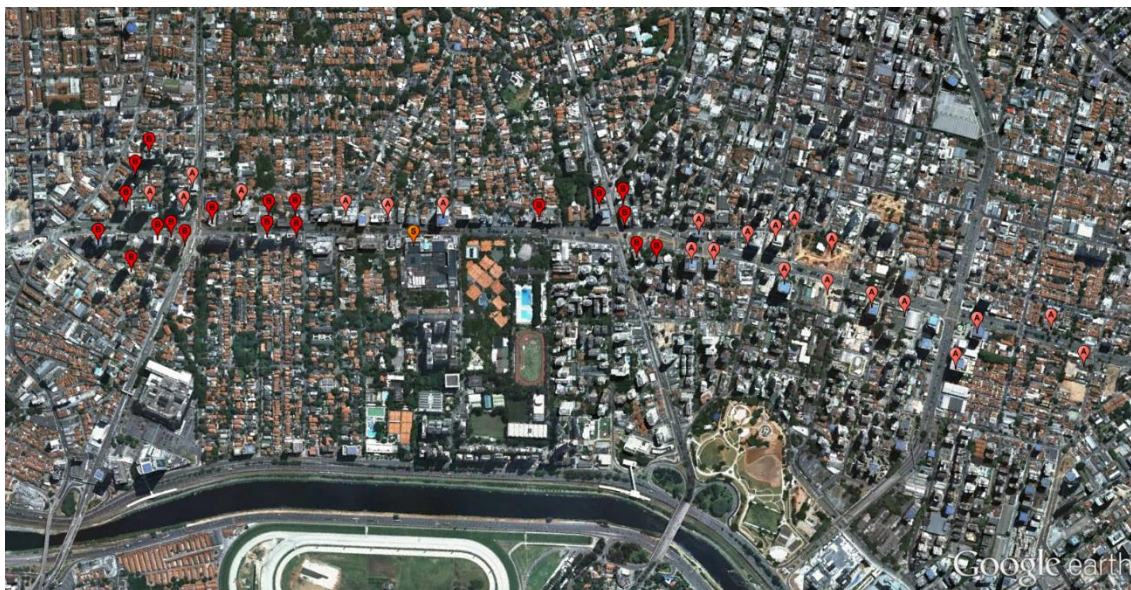


Figura III.5 – Localização dos prédios ao longo da Av. Brig. Faria Lima.

A localização das cargas térmicas indicadas desse levantamento não foi utilizada, pois no banco de dados disponível não consta o georreferenciamento dos imóveis. Isso poderia ser contornado através dos endereços fornecidos, de forma manual, mas com muito dispêndio de tempo. Além disso, a distribuição desses imóveis se dá, na maior dos casos, ao longo das avenidas mais importantes, ou seja, de forma muito linear. Para o desenvolvimento do restante deste trabalho é mais interessante que essas cargas de resfriamento estejam distribuídas mais em forma de áreas do que na forma de linhas.

No entanto, as demais informações desse levantamento foram muito importantes para a determinação de índices de consumo específico e porque também possibilitaram um obter um panorama geral da aplicação dos sistemas de ar condicionado, principalmente nos prédios de escritórios.

### III.1.3 - *Usando fotografias e imagens de satélites*

As fotografias em três dimensões, as fotos aéreas e as fotos obtidas por meio de satélites também podem ser utilizadas para a localização das cargas de térmicas de resfriamento para uma região. Em função da área e do tipo de imóvel que é considerado pode-se estimar a carga térmica e o consumo de energia naquele local.

Isso pode ser feito de forma manual ou automatizada. Existem aplicativos computacionais (QuantunGis ou ArcGis) que foram desenvolvidos especialmente para esse tipo de uso. Essas imagens, que podem conter diferentes bandas do espectro, visíveis ou não, podem ser manuseadas por meio de ferramentas de tratamento de imagens acelerando muito os processos de classificação. No entanto, para que seja aplicada a classificação automatizada, além dos *softwares* específicos são necessárias imagens de satélite que sejam recentes e em alta resolução, e normalmente, isso não está disponível para o público.

Nesse trabalho foram utilizadas fotos e imagens obtidas através do software Google Earth e que estão disponibilizadas de forma gratuita na Internet. Todo o trabalho de seleção e classificação dos imóveis foi feito de forma manual.

A região que foi selecionada para o Estudo de Caso no presente trabalho, denominada área de interesse, está situada em São Paulo, capital, e abrange uma boa parte do centro antigo da cidade. Ela está delimitada por um polígono com um formato aproximadamente retangular com 1440 ha de área, conforme a Figura III.6, que mostra essa área sobre uma imagem do Google Earth.

Os principais limites dessa área são formados pela Rua da Consolação, pela Rua Dona Maria Paula, pela Avenida 23 de Maio, pelo contorno do Parque do Ibirapuera, passando pela Avenida Pres. Juscelino Kubitschek, continuando pela Avenida Brig. Faria Lima, seguindo pela Avenida Rebouças e fechando no ponto de início.



Figura III.6 – Limites da região selecionada para este trabalho.

Estando delimitada a área de interesse, foram realizados milhares de “visitas virtuais”, mais de quinze mil delas, cobrindo quase a totalidade dos imóveis da região. E em seguida esses imóveis foram classificados adotando um padrão de consumo de energia elétrica conforme o seu tipo, a sua área ocupada e a sua altura de acordo com o que está mostrado na Tabela III.1.

Tabela III.1 - Unidades consumidoras identificadas e consumo estimado.

| <b>Tipo de imóvel</b> | <b>Área total</b> | <b>[m<sup>2</sup>]</b> | <b>Consumo adotado</b> |
|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
|                       |                   |                        | <b>[MWh/mês]</b>       |
| Casa pequena          | Até 250           |                        | 0,5                    |
| Casa média            | 500               |                        | 1,0                    |
| Casa grande           | 1.000             |                        | 2,0                    |
| Prédio pequeno        | 10.000            |                        | 20,0                   |
| Prédio médio          | 20.000            |                        | 50,0                   |
| Prédio grande         | Acima de 30.000   |                        | 80,0                   |

Ressalta-se que a esse modo de localização do consumo de energia elétrica e, consequentemente, das cargas de resfriamento resulta em um mapa com o consumo aproximado, em função das grandes incertezas quanto à classificação visual de cada imóvel consumidor. Mas por outro lado, possibilita um levantamento de rápido e de baixo custo.

#### III.1.4 - *Método da Janela Móvel*

O tratamento e o processamento de dados e informações que se encontram distribuídos espacialmente em uma área pode ser feito usando-se um ferramental bastante variado. Neste trabalho o tratamento das cargas de resfriamento que foram localizadas na etapa anteriormente será feito usando a metodologia da Janela Móvel.

Esse método teve sua origem em 2003 durante estudos de diagnósticos energéticos que foram realizados para a Celesc – Centrais Elétricas de Santa Catarina SA. Depois disso ele foi modernizado e foram agregadas ferramentas SIG. Em 2014 ele foi usado pela Secretaria de Energia na pesquisa e o mapeamento de potenciais hidrelétricos remanescentes nas bacias dos rios localizados no estado de São Paulo.



O método pode ser resumidamente explicado como segue. Ele consiste em uma área ou janela de tamanho fixo que é movida dentro de toda a região de interesse, passo a passo, em intervalos regulares. As informações desejadas são processadas e armazenadas, somente dentro dos limites dessa janela, em cada um dos movimentos.

É muito semelhante com uma operação de média móvel. Porém, no caso da janela móvel, em vez de médias podem ser usadas outras funções e todos os cálculos são ser realizados em duas dimensões.

### III.1.5 - *Concentração das cargas térmicas de climatização*

Um dos principais objetivos desse trabalho é avaliar a viabilidade da substituição dos sistemas centralizados de ar condicionado convencionais por equipamentos de cogeração acoplados com máquinas de refrigeração por absorção. Considerando o porte e pelas características de operação desses equipamentos isso só será viável quando houver uma concentração espacial das maiores cargas de resfriamento.

Assim os locais de maior interesse para a implantação de plantas de cogeração/climatização são aqueles com maior concentração de consumo e maior demanda térmica de ar condicionado. Nessas regiões se encontram os maiores centros de cargas, geralmente com um índice de verticalização mais elevado, onde estão os maiores prédios.

Considerando então que o consumo de ar condicionado pode ser abatido por plantas de cogeração, avaliou-se o potencial de consumo de refrigeração que seria passível de ser substituído. Neste sentido, apenas os prédios foram isolados e considerados para estimativa da demanda térmica de ar condicionado. Sendo que essa última foi calculada considerando que, da energia elétrica consumida, 60, 50 e 40% é a parcela da energia consumida pelos sistemas de ar condicionado para pequenos, médios e grandes consumidores, respectivamente. Esses valores foram adotados com base nos consumos específicos médios com ar condicionado por unidade de área que foram verificados nos questionários aplicados pela Comgás para a RMSP.

Em princípio, todas cargas de resfriamento que estão distribuídas em uma determinada área podem ser atendidas por um único sistema centralizado para produção de água gelada. Bastando transportar essa água até os pontos de consumo.

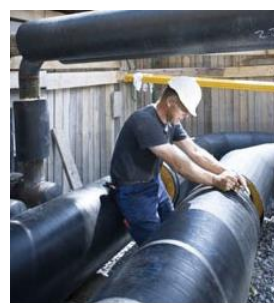
No entanto, essa tarefa não é tão trivial quanto parece. O transporte até esses locais de consumo exige pelo menos dois trechos de tubulação, uma para recalque e outra para o retorno

dessa água. Além disso, esses tubos devem ser muito bem isolados termicamente, possuir barreiras contra a penetração de umidade e protegidos contra danos mecânicos. Isso resulta na ocupação de um razoável espaço adicional em torno deles.

Nesses sistemas centralizados de ar condicionado é padrão usar a água gelada sendo bombeada a uma temperatura em torno de 7°C e retornando com cerca 12°C. Isso é feito desse modo para seja possível um controle adequado e eficiente da umidade do ar que é insuflado nos recintos condicionados. Como o diferencial de temperatura dessa água é muito reduzido, de apenas 5°C, isso deve ser compensado por maiores vazões de água gelada em circulação pelo sistema. De acordo com instalações já conhecidas pelo autor, um sistema de ar condicionado de médio porte, com capacidade de 2000 kW, cerca de 600 TR, opera com uma vazão de água gelada em torno de 250 m<sup>3</sup>/h, exigindo tubulação com diâmetro interno de no mínimo 200 mm. Caso as distâncias envolvidas sejam maiores esse diâmetro por ser maior ainda. Isso pode ser visto na Figura III.7 que mostra duas situações típicas na passagem dos dutos de distribuição de água gelada (SYDNEY, 2013).



a)



b)

Figura III.7 – a) Dutos em uma calçada. b) Duto de grande diâmetro.

Se o transporte da água gelada acontece dentro de uma mesmo imóvel ou então para as suas vizinhanças, no interior de uma mesma quadra, não se observam muitos problemas. Porém, quando o transporte tem que ser feito em maiores distâncias, pode-se envolver o uso de terrenos de terceiros e a transposição de vias públicas e as situações encontradas se tornam muito mais complexas, ainda que a legislação municipal existente permita o uso compartilhado do solo para a abertura de galerias e passagens subterrâneas com esse tipo de finalidade.

São justamente essas dificuldades na passagem das tubulações de transporte de água gelada que limitam o tamanho da área que pode ser atendida por um sistema centralizado de

produção de água gelada. Levando em consideração todos esses motivos, nesse trabalho adotou-se como limite para o transporte de água gelada uma distância máxima de 500 m. Com isso a Janela Móvel adotada foi uma área quadrangular com lados iguais a 1000 m. O passo de cada movimento da janela foi fixado em 100 m.

A Figura III.8, a seguir, mostra esse procedimento de forma esquemática.

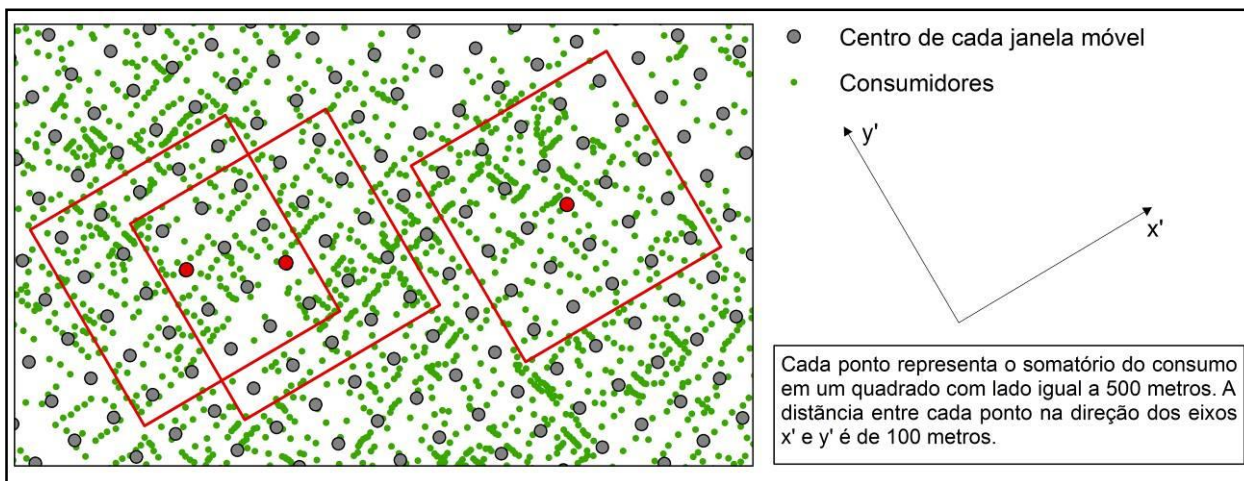


Figura III.8 - Exemplo do procedimento de janela móvel.

Assim, quando se considera uma cidade com quadras de tamanho normal, com lados de 100 x 100 m e com os arruamentos e calçadas com 12 m de largura, é possível partir do centro de uma dessas áreas e alcançar qualquer ponto dessa área com no máximo cinco passagens sobre as vias públicas.

Observa-se que o esforço computacional e o tempo de processamento utilizado para durante os cálculos depende muito fortemente do número de informações, ou seja, de qual é o tamanho da área de interesse e da quantidade de dados coletados. Um processamento de uma Janela Móvel de malha 50x50 com passo de 10 unidades leva cerca de 3 minutos, para malha de 100 x 100 é necessário um tempo em torno de 35 minutos. Por esse motivo, antes da aplicação do método da janela móvel as informações existentes que estavam originalmente georreferenciadas com resolução 1 metro, ou seja, malha de 1000 x 1000, foram concentradas para resolução de 20 metros, isto é, malha de 50 x 50. Com esse artifício, foi possível reduzir significativamente a quantidade de tempo necessário para o processamento e ainda alcançar um resultado preciso o suficiente para os propósitos desse trabalho.

Ressalta-se que as planilhas que foram utilizadas no presente trabalho permitem alterar muito facilmente o formato, o tamanho da janela e o comprimento do passo usado para o método da janela móvel. Isso é desejado para a análise de regiões diferentes com características distintas para a distribuição das cargas de resfriamento.

O produto final da primeira etapa, da localização das cargas de resfriamento, é um mapa com a posição e o valor das maiores cargas de ar condicionado que podem ser substituídas por sistemas de cogeração e produção de água gelada. Um exemplo desse tipo de mapa está mostrado na Figura III.9 mostrando o resultado da aplicação da janela móvel na área de interesse.

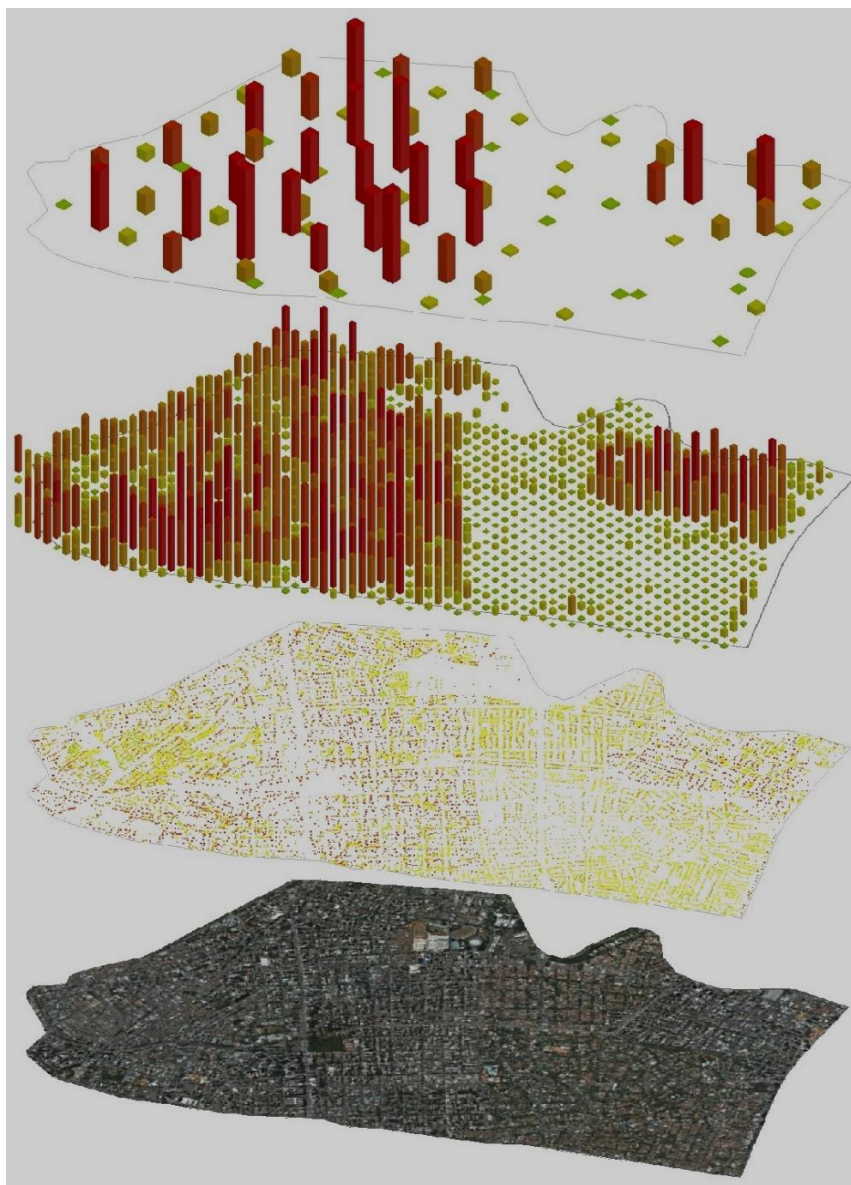


Figura III.9 – Produto final da primeira etapa desse trabalho.



Na primeira camada dessa figura é representada a imagem de sensor remoto a partir do qual foi feita a avaliação visual para a coleta de dados através do Google Earth. Na segunda camada está mostrada a base de dados vetoriais criada para representar as cargas de carga de resfriamento. A terceira camada mostra a representação dessas cargas já preparadas e concentradas em uma malha de maior dimensão. Na camada superior estão mostrados os valores das cargas de resfriamento depois de serem aglutinadas usando o método da Janela Móvel. Nessas duas últimas ilustrações os valores das cargas de resfriamento estão indicados através da dimensão e das cores das colunas, onde ficam evidenciados os locais onde estão as maiores concentrações de cargas térmicas de climatização.

Em seguida, tais informações podem ser usadas nas duas etapas restantes desse trabalho, verificando-se as condições técnicas para a localização e ordenamento dessas centrais e depois comprovando-se ou não a viabilidade econômica dos empreendimentos.

### ***III.2 - Localização das centrais de cogeração***

Na Figura III.9 as maiores colunas da camada superior representam, pelo menos do ponto de vista energético, os locais que são mais favoráveis para implantação de plantas de cogeração acopladas com sistemas de absorção, pois elas representam os locais onde existem as maiores concentrações de energia que é utilizada com ar condicionado e que são passíveis de serem substituídas.

No entanto, somente esse critério é insuficiente para uma tomada de decisão mais acertada, pois na maioria dos casos serão muitas centrais de cogeração e climatização e existem diversos outros fatores que também devem ser levados em consideração, além da concentração de cargas, devem estar presentes um conjunto de outras condições e requisitos tais como: as redes de distribuição de gás não podem estar muito distantes, existência de terrenos vagos e que eles sejam adequados para a construção das centrais, que os custos de aquisição desses terrenos sejam acessíveis e que não existem restrições ou impeditivos ambientais para a instalação do empreendimento.

Tais fatores serão, em cada caso, potencialidades ou impeditivos à implantação das plantas de cogeração. Nessa etapa desse trabalho, além da localização dos pontos com os

maiores consumos de energia com ar condicionado serão incluídos na análise os seguintes aspectos:

- Existência de restrições ou impeditivos ambientais
- Facilidade para acessar as redes de gás natural
- Facilidade para a conexão com subestação elétrica
- Disponibilidade de terrenos vagos nas proximidades
- Valor do solo urbano na região

Todos esses aspectos e o mapa com a localização das cargas térmicas de resfriamento devem ser avaliados de forma conjunta estabelecendo-se para cada um notas e pesos de acordo com o grau de importância. Assim, os locais mais indicados para implantação das centrais serão aqueles que obtiverem a melhor pontuação.

A metodologia utilizada para realizar essa tarefa denomina-se Avaliação Espacial Multicritério. É um tipo de ferramenta comum nos aplicativos que trabalham com SIG e pode ser implementada sem dificuldades (MALCZEWSKI – 1999).

Esse método consiste basicamente em fixar e depois trabalhar com os *atributos de ponto* em uma determinada região de interesse. Ou seja, atribuir notas ou conceitos para os diversos aspectos que um ponto pode assumir e em seguida realizar operações lógicas e matemáticas com eles.

Ressalta-se que não existem limites para a quantidade de aspectos que podem ser incluídos nessa avaliação e, além disso, eles podem ser de uma infinidade de tipos. Eles podem ser numéricos: 1530 metros é o valor da altura para o aspecto relevo. Podem ser literais (*strings*): o texto ‘azul’ pode ser o valor de um atributo para o aspecto cor e o ‘argiloso’ em relação ao aspecto tipo de solo. Assim, dependendo do aspecto que está em análise, os atributos de ponto podem assumir valores interessantes e criativos tais como: distante, perto, custo muito elevado, falso, com vista para o mar, entre outros.

Depois que todos os pontos receberam seus atributos os mesmos podem ser normalizados. Isso consiste em traduzir valores expressos em forma de textos e conceitos para a linguagem numérica e depois então serem multiplicados pelos seus pesos. Dessa forma, os aspectos considerados mais relevantes também terminam tendo maior influência na localização das centrais de cogeração. Em seguida, são estruturados uma série filtros e sentenças lógicas combinando, todas camadas ou aspectos considerados.



A Figura III.10 mostra como esses filtros são utilizados nesse trabalho. Na primeira camada na parte inferior estão marcadas as localizações das cargas térmicas de resfriamento que, se possível, devem ser substituídas pelas centrais de cogeração e produção de água gelada.

A segunda camada apresenta a localização das áreas vazias, considerando o traçado de uma margem de 100 metros em torno da mesma. Assim, para ser selecionada, uma central de cogeração deve estar localizada próxima de um terreno vago. Caso não seja feita nenhuma seleção, uma das soluções pode ser alterar essa margem. A próxima camada trata da facilidade da conexão com o sistema elétrico da concessionária. Quanto a central está próxima de uma subestação, evidentemente, mais fácil é a conexão. Esse por esse critério as centrais recebem pontuação dadas por patamares, à medida que a distância aumenta a pontuação é reduzida.

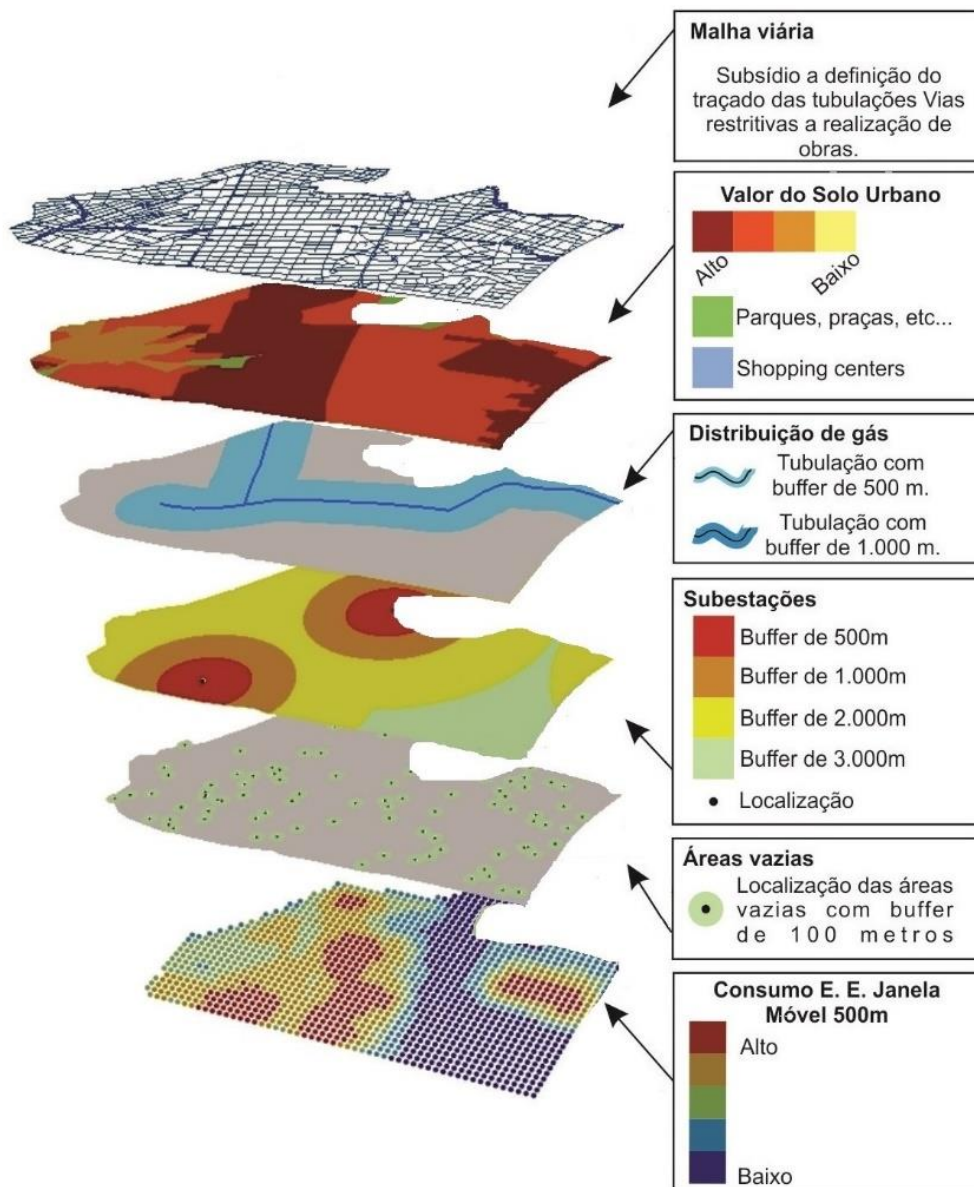


Figura III.10 – Produto final da segunda etapa desse trabalho.

Na camada seguinte estão as informações da rede de gás da concessionária. A pontuação é dada de forma semelhante, mas ao invés de distâncias de ponto até ponto, consideram-se distâncias de pontos a linhas.

A quinta camada é aquela que trata do custo de aquisição dos terrenos urbanos. Custos mais altos fazem com que a pontuação seja mais baixa. Na sexta camada está representada a malha viária do local indicando possíveis dificuldades de acesso e construção.



Podem ser agregadas mais camadas, podendo ser inserido um mapa com a localização de possíveis clientes de calor. Desse modo, todos os pontos próximos desses clientes são mais bem pontuados e funcionam como um atratores.

Ao contrário, quando forem incluídos locais que dificultem a instalação de centrais, por exemplo as áreas de proteção ambiental, os pontos próximos a essas áreas recebem notas muito baixas ou zero, funcionando como repulsores.

### ***III.3 - Estudos Energéticos***

No presente trabalho os estudos energéticos são usados para determinar os montantes de energia transacionados entre as centrais de geração de cogeração, as concessionárias de eletricidade e de gás natural e pelos demais consumidores, que podem ser também pode ser clientes de energia elétrica ou de energia térmica.

Desse modo, com esses montantes conhecidos e mais as tarifas de compra de gás natural, compra e venda da energia elétrica e considerando os custos de investimento e O&M do equipamento pode ser feita uma análise da viabilidade econômica dessas centrais.

Por isso a modelagem utilizada é simplificada e não se considera nenhum tipo de ajuste no rendimento ou na eficiência dos equipamentos em função de variação nas condições de pressão atmosférica, temperatura ou umidade do ambiente em relação as condições padrão. Caso necessário, isso pode ser feito depois que a localização das centrais estiver sido estabelecida.

Por isso, nesses modelos serão introduzidos apenas dois tipos de correção. Uma delas é feita em razão da variação do rendimento nominal do equipamento de acordo com o seu porte. Como uma regra geral, quase sempre que o tamanho da máquina aumenta o seu rendimento melhora, e isso não pode ser desprezado, já que esses rendimentos podem variar em uma faixa muito ampla. Nos motores de combustão, de acordo com dados de vários fabricantes, ele é da ordem de 20% para os pequenos motores de até 20 kW e alcança cerca de 50% nos equipamentos maiores, com potências em torno de 20 MW. A outra correção se faz necessária por que as demandas elétricas e térmicas são cargas variáveis. Por conseguinte, o equipamento que atende essas cargas opera com um carregamento variável. Nesses modelos tal efeito é considerado fazendo, ponto a ponto, ajustes no rendimento em função da carga em relação ao

carregamento nominal. Isso é importante no caso de motores de combustão e mais ainda para os compressores centrífugos empregados nos sistemas de refrigeração.

Para este trabalho foram elaborados cinco modelos, o primeiro para representar as demandas de potência elétrica e térmica e os demais para os seguintes equipamentos: *chiller* convencional elétrico, grupo moto gerador a gás natural e *chiller* de absorção.

#### a) Modelos para as demandas

As demandas de energia elétrica e térmica são representadas por séries de valores contendo a potência elétrica e a carga térmica. Para coerência com os sistemas de medição e de faturamento das concessionárias de energia elétrica, adota-se integração de dados feita a cada 15 minutos. Caso necessário, são usadas séries distintas para os dias úteis e para os feriados, sábados e domingos, quando não há cobrança diferenciada pelo uso da energia elétrica no horário de ponta do sistema.

A Figura III.11 mostra um gráfico com as demandas elétricas e térmicas para um consumidor típico, por exemplo um centro comercial. Ressalta-se que apesar dessas demandas possuírem a mesma unidade, estarem apresentadas na mesma escala e no mesmo eixo, elas representam espécies de energia muito distintas quanto à sua qualidade.

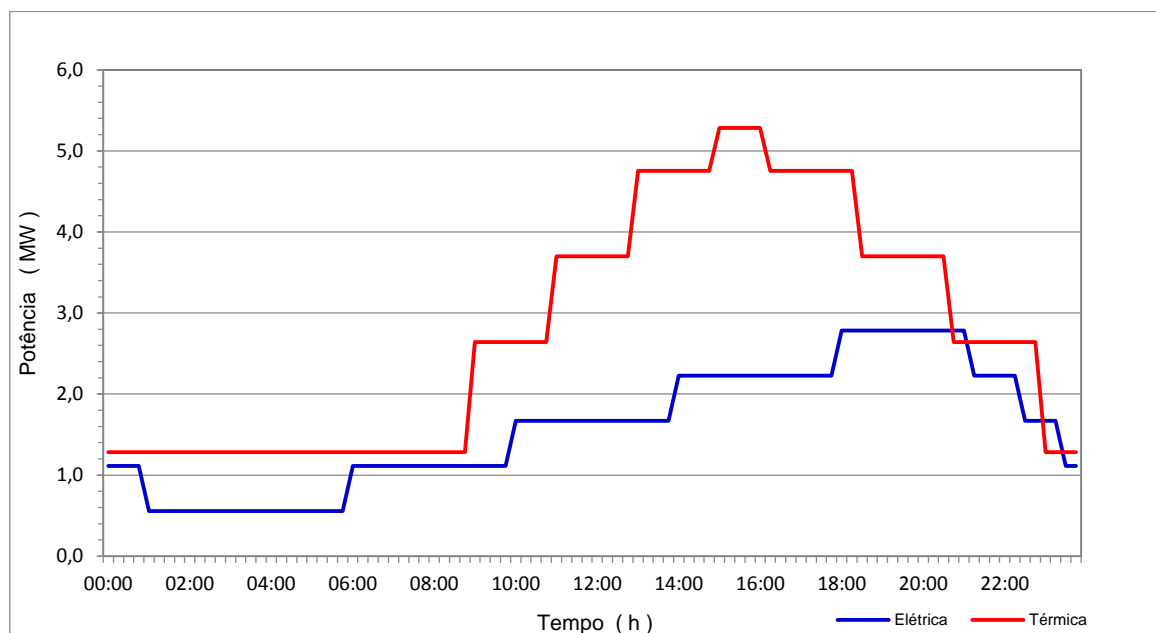


Figura III.11 – Demandas de potência elétrica e térmica.



### **b) Modelo de *chiller* convencional**

Esse modelo foi elaborado para representar o que acontece na situação presente, onde a concessionária de eletricidade é responsável em atender as duas demandas de energia. A uma parcela da demanda é exclusivamente elétrica e é normalmente usada para iluminação, para a força motriz e demais usos específicos. A outra parcela dessa energia elétrica é utilizada para atender a necessidades de energia térmica em ar condicionado.

O objeto de trabalho são os equipamentos centralizados de produção e distribuição usando circuitos de água gelada. São as convencionais máquinas frigoríficas de compressão acionadas por motores elétricos, denominadas de forma corrente de *chillers* elétricos.

Nesse modelo as temperaturas estão fixadas nos seus valores padronizados. A água gelada é resfriada a 7°C e retorna em 12°C. No caso das torres de resfriamento, a água é enviada a 37°C e retorna em 32°C. Para considerar a potência instalada nos equipamentos auxiliares, motores das bombas e dos ventiladores das torres, adotou-se 5,0% da capacidade térmica do *chiller*, de acordo com os valores de perda de carga que são mostrados nos catálogos dos fabricantes.

A variável de entrada independente é a capacidade frigorífica. Assim, determina-se a vazão de água gelada produzida, a potência elétrica consumida e a vazão da água usada no condensador e a energia que é dissipada nas torres de resfriamento. A Figura III.12 apresenta esse modelo mostrando resultados numéricos obtidos para uma capacidade frigorífica igual a 1,0 MW. O valor do rendimento nominal é determinado conforme está explicado em seguida.

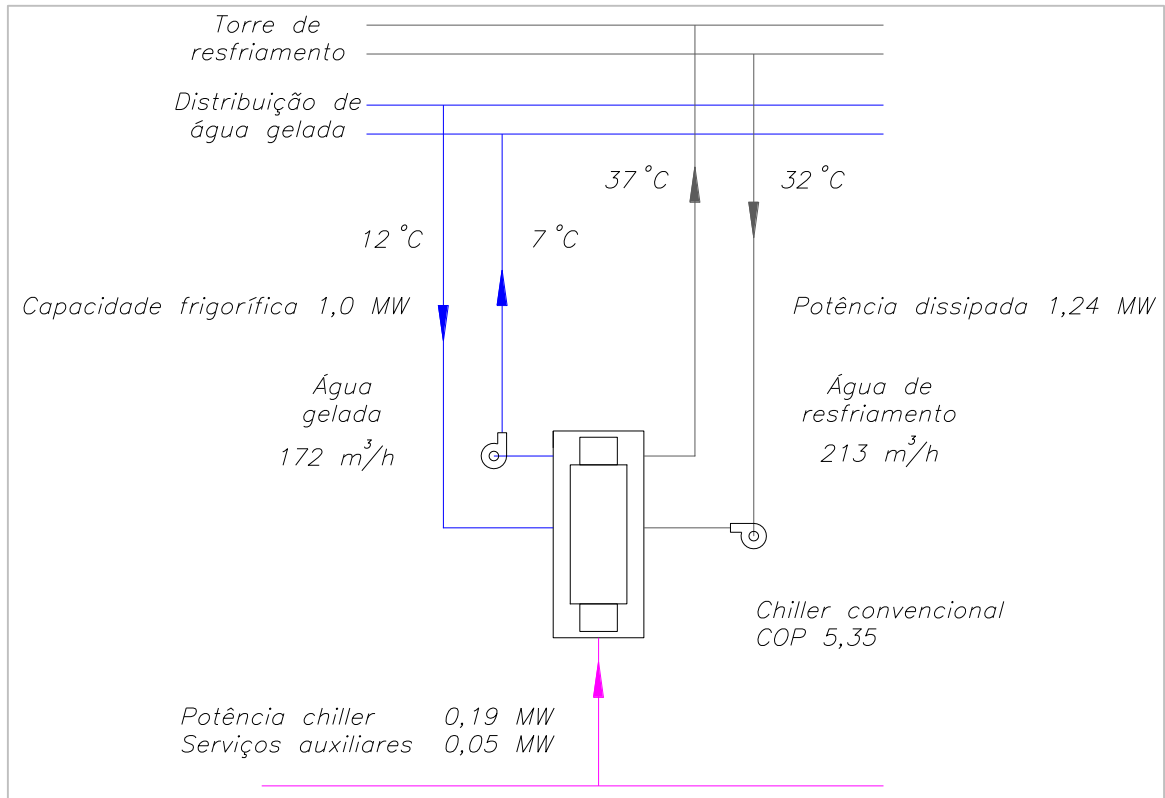


Figura III.12 – Resultados do modelo do chiller elétrico.

O rendimento nominal é determinado em função da capacidade frigorífica do equipamento, ou seja, considerando o porte da instalação. Para isso, com informações fornecidas por alguns fabricantes, foram levantados valores de potência elétrica e de capacidade frigorífica para máquinas de diversos tamanhos e configurações.

Considerando-se para cada equipamento, a existência ou não de equipamentos auxiliares tais como bombas e tores de resfriamento, a relação entre a capacidade frigorífica e a potência consumida foi calculada para cada um desses equipamentos. Aqui, esse rendimento nominal se assemelha ao Coeficiente de Performance – COP, que é definido na Termodinâmica, e como ele, também pode assumir valores maiores que a unidade.

Com os valores obtidos ajustou-se uma equação para representar o comportamento desse conjunto de máquinas. Na Tabela III.1 podem ser vistos alguns detalhes das máquinas consideradas. A Figura III.13, que está logo em seguida, mostra esses valores plotados em um gráfico e a equação resultado do melhor ajuste.



Tabela III.2 – Capacidade, potência e rendimento nominal para vários equipamentos.

|            | <b>Tipo</b>    | <b>Capacidade</b><br>[ kW ] | <b>Potência</b><br>[ kW ] | <b>Rendimento</b><br>[ / ] |
|------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Electrolux | Split          | 3,51                        | 1,18                      | 2,97                       |
| Springer   | Split          | 3,51                        | 1,27                      | 2,78                       |
| Toshiba    | Split          | 3,51                        | 1,07                      | 3,28                       |
| Carrier    | Cassete        | 5,27                        | 2,02                      | 2,61                       |
| Consul     | Janela         | 7,91                        | 3,98                      | 1,98                       |
| Carrier    | Cassete        | 13,5                        | 4,69                      | 2,88                       |
| Toshiba    | Self a água    | 45,0                        | 13,1                      | 3,44                       |
| Carrier    | Chiller a água | 563                         | 105                       | 5,36                       |
| Carrier    | Chiller a água | 1354                        | 243                       | 5,58                       |
| Hitachi    | Chiller a água | 1407                        | 253                       | 5,56                       |
| Hitachi    | Chiller a água | 4396                        | 726                       | 6,06                       |
| Mitsubichi | Chiller a água | 7032                        | 1131                      | 6,22                       |

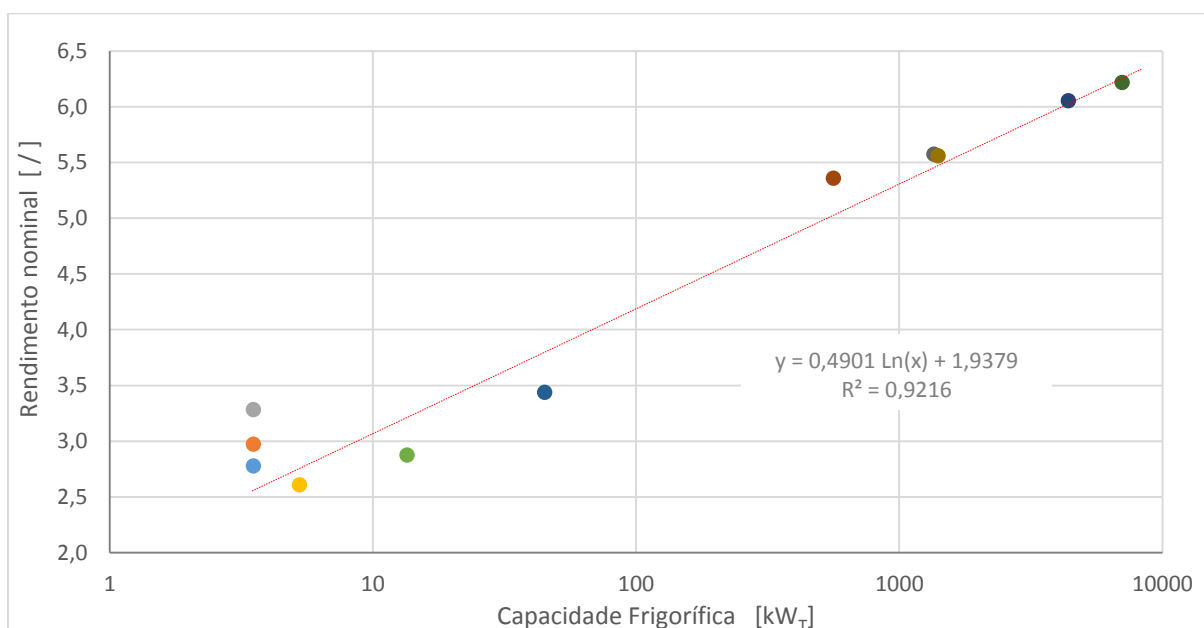


Figura III.13 – Variação do Rendimento com a Capacidade Frigorífica.

Para considerar a variações da demanda nesse modelo, o rendimento é ajustado continuamente conforme a variação do carregamento do *chiller*. Entende-se aqui o termo carregamento de um equipamento como a relação entre a capacidade que está operando e a

capacidade nominal, ou de projeto. Para isso então admite-se neste trabalho que os equipamentos modelados têm um comportamento similar aos compressores citados na publicação do fabricante (MITISUBICHI, 2010) de onde foram retiradas as curvas mostradas no gráfico da Figura III.14. A partir desse gráfico foram obtidas equações de forma a representar o comportamento de forma contínua. Na figura está mostrada a equação empregada para a temperatura de entrada da água de resfriamento no condensador igual a 32°C, o valor que é adotado para esse nesse trabalho.

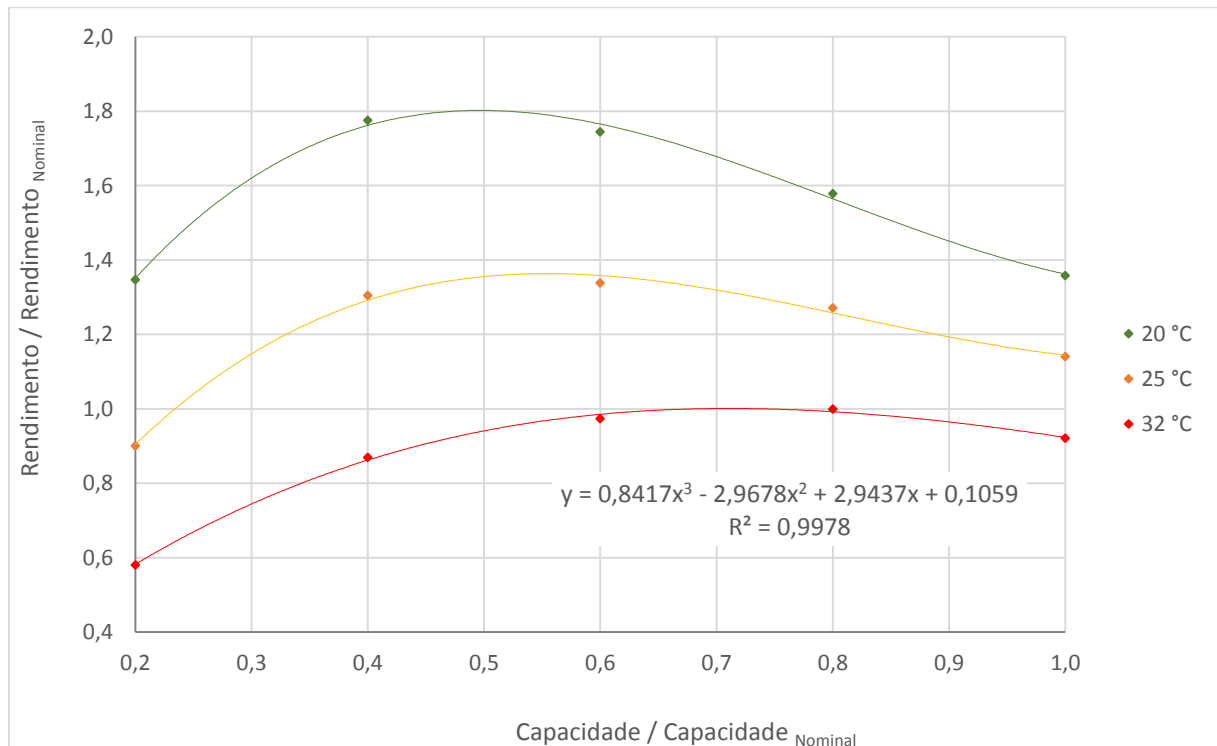


Figura III.14 – Variação do rendimento com o carregamento do equipamento.

Em seguida é feita a modelagem da configuração proposta, ou seja, substituindo-se o *chiller* convencional por um de absorção junto de um motor a gás gerando energia elétrica. Os grupos geradores a gás e a máquinas de refrigeração por absorção são analisados em dois modelos separados e posteriormente serão acoplados.

### c) Modelo de grupo motor gerador

A modelagem empregada para os grupos motores geradores considera quatro rendimentos distintos. O primeiro deles é com relação à transformação que ocorre no motor com a energia do combustível sendo convertida em energia mecânica. Depois considera-se o rendimento do gerador na transformação da energia mecânica em eletricidade. O terceiro rendimento é o que decorre da produção de calor que é rejeitado pelo motor, já que está se tratando de um sistema de cogeração. E, finalmente, o quarto deles considera a eficiência do sistema de reutilização do calor fornecido pelo motor.

Os dois primeiros rendimentos influenciam diretamente a produção da energia elétrica, um dos produtos finais que é desejado. O terceiro rendimento é o térmico, que afeta somente a parcela da recuperação do calor, determinado considerando como limite mínimo de 120 °C para temperatura de saída dos gases de escape. O quarto rendimento inserido nesse modelo indica quanto é eficiente a utilização do calor rejeitado. Para esse rendimento usou-se um valor de 97% somente para considerar perdas.

Os resultados desse modelo para um grupo motor gerador com potência elétrica nominal de 5,0 MW estão mostradas na Figura III.15. Foram adotados rendimentos elétricos e térmicos iguais a 44% e 46%, respectivamente.

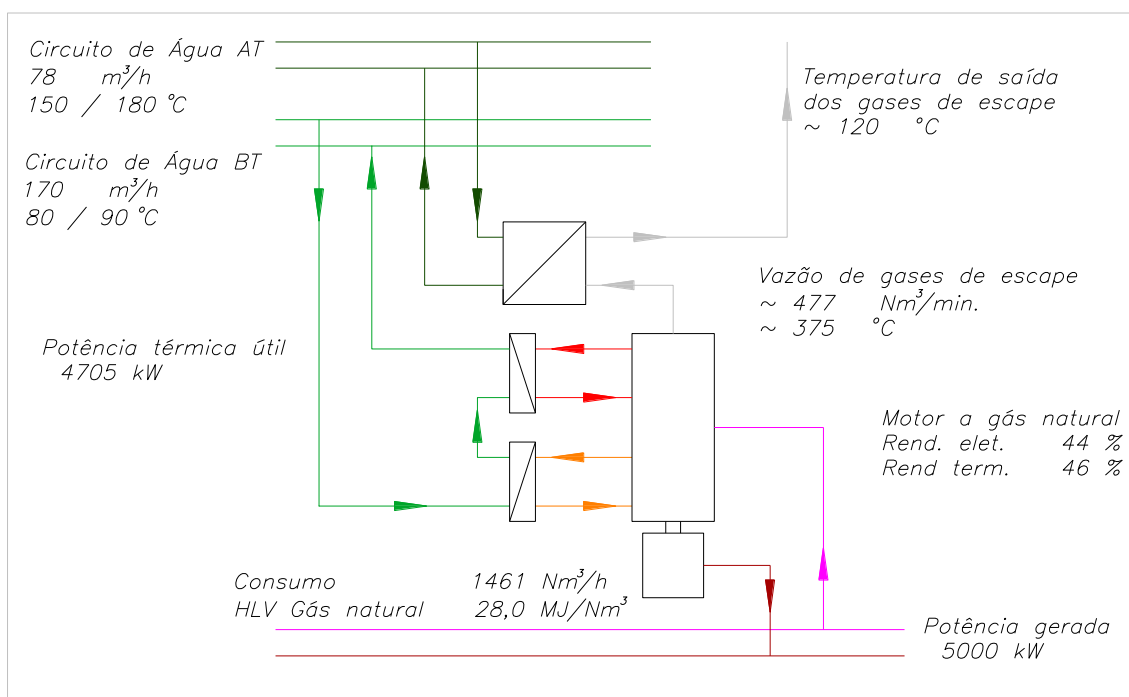


Figura III.15 – Resultados do modelo do motogerador.



Podem ser usadas várias configurações para a recuperação o calor rejeitado. No modelo mostrado a recuperação é feita através de dois circuitos para geração de água quente. O de alta temperatura usa o calor dos gases de escape e o de baixa temperatura, recupera energia da água de resfriamento e do óleo lubrificante. Observa-se que, devido a suas vantagens, esse tipo de configuração de recuperação de calor é uma das mais indicadas para ser usada para os motores de combustão em conjunto com *chillers* de absorção para produção de água gelada.

Como foi feito para na modelagem anterior, o rendimento dos motores a gás também é determinado em função do porte do equipamento. Nesse caso foram usadas informações de vinte e sete grupos gerador acionados por motores a gás de diversos tamanhos, fornecidos por cinco fabricantes distintos. A potências e os rendimentos podem ser vistos na Tabela III.3.

Tabela III.3 – Rendimento de alguns motores a gás.

| Num. | Fabricante  | Modelo      | Potência MW | Rendimento % |
|------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1    | Caterpillar | 3608 DM5039 | 1,54        | 38,7         |
| 2    | Caterpillar | 3608 DM5038 | 1,64        | 38,8         |
| 3    | Caterpillar | 3612 DM5396 | 2,34        | 40,0         |
| 4    | Caterpillar | 3612 DM5395 | 2,62        | 40,5         |
| 5    | Caterpillar | CG260-12 A  | 3,00        | 43,7         |
| 6    | Caterpillar | 3616 DM5398 | 3,11        | 40,5         |
| 7    | Caterpillar | 3616 DM5397 | 3,48        | 40,8         |
| 8    | Caterpillar | CG260-16 A  | 4,00        | 43,7         |
| 9    | Caterpillar | GCM34-16    | 6,52        | 46,8         |
| 10   | Caterpillar | GCM34-20    | 9,70        | 46,9         |
| 11   | Cummins     | C334N6C     | 0,33        | 33,4         |
| 12   | Cummins     | C1000N6C    | 1,00        | 41,7         |
| 13   | Cummins     | C1100N6C    | 1,10        | 41,9         |
| 14   | Cummins     | C1250N6C    | 1,25        | 37,1         |
| 15   | Cummins     | C1400N6C    | 1,40        | 36,6         |
| 16   | Cummins     | C1750N6C    | 1,75        | 37,6         |
| 17   | Cummins     | C2000N6C    | 2,00        | 39,5         |
| 18   | Wärtsilä    | 9L 34 SG    | 4,34        | 45,9         |
| 19   | Wärtsilä    | 16V 34 SG   | 7,74        | 46,0         |
| 20   | Wärtsilä    | 20V 34 SG   | 9,73        | 46,3         |
| 21   | Wärtsilä    | 18V 50 SG   | 18,75       | 48,6         |
| 22   | Waukesha    | VHP3604     | 0,60        | 30,9         |
| 23   | Waukesha    | 16V150LT    | 1,10        | 40,8         |
| 24   | Waukesha    | VHP9500GL   | 1,48        | 34,3         |
| 25   | Waukesha    | APG 2000    | 1,90        | 40,3         |
| 26   | Waukesha    | APG 3000    | 2,85        | 40,4         |
| 27   | Waukesha    | 16V275GL    | 3,11        | 38,4         |

A partir das informações dessa tabela ajustou-se uma equação para representar, em termos nominais, o comportamento do rendimento total pela potência elétrica para essa amostra. A Figura III.16 mostra um gráfico com os resultados e a equação obtida. Os parâmetros da equação, determinada usando o *Table Curve*, estão na mostrados na Figura III.16.

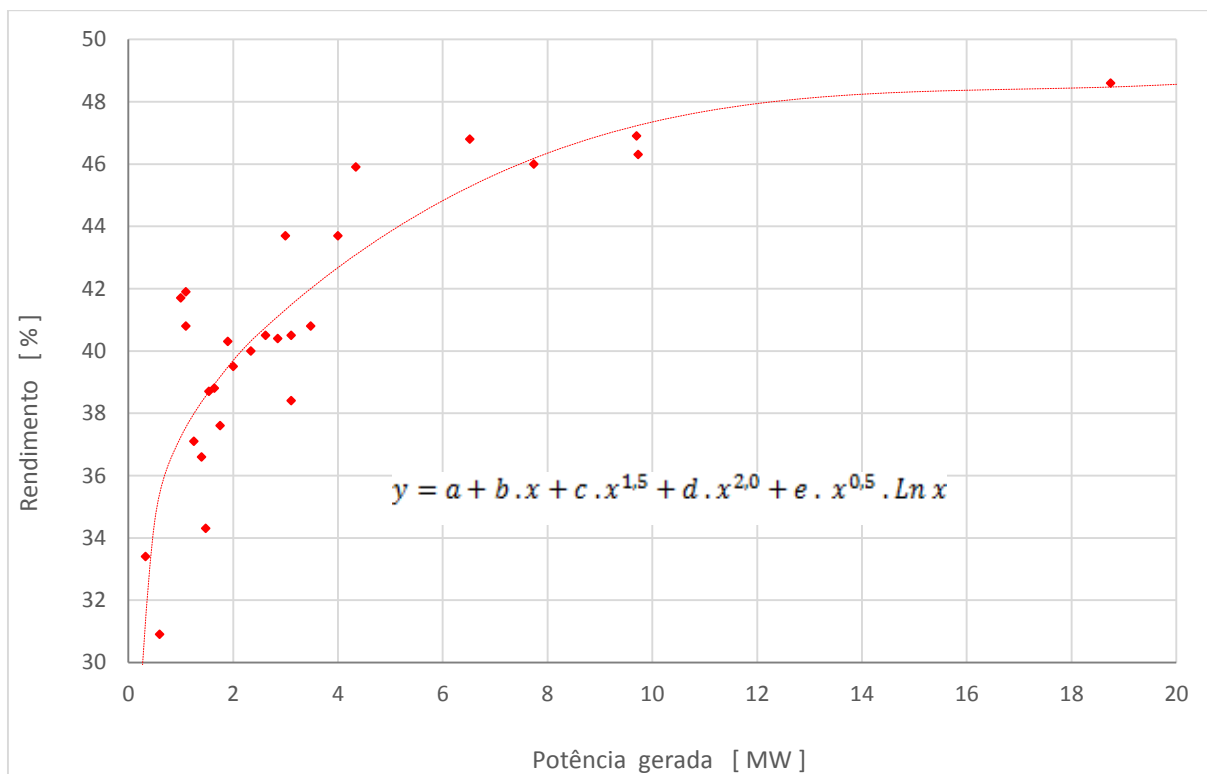


Figura III.16 – Rendimento de motores a gás.

Tabela III.4 – Coeficientes da equação do rendimento de motores.

| Coeficientes da equação         | Valor       |
|---------------------------------|-------------|
| <i>a</i>                        | -0,03830236 |
| <i>b</i>                        | 0,47516579  |
| <i>c</i>                        | -0,06900365 |
| <i>d</i>                        | 0,00453034  |
| <i>e</i>                        | -0,34482157 |
| Coeficiente de correlação $r^2$ | 0,74426804  |

De forma a levar em conta a variação do rendimento dos motores com a mudança do carregamento adota-se nesse trabalho que os motores a gás modelados tenham um comportamento típico. E que foi determinado a partir de informações fornecidas pelos fabricantes para o consumo de combustível. Foram coletados dados de 13 motores de diversos fabricantes com potências nominais variando entre 0,5 até 4,0 MW em condições de 100, 75 e 50% do carregamento.

A partir desses valores plotou-se o gráfico da Figura III.17. Depois disso determinou-se uma equação para a interpolação desses dados. Ela é usada no modelo do motor para correções no rendimento, efetuadas ponto a ponto, de acordo com as variações do carregamento.

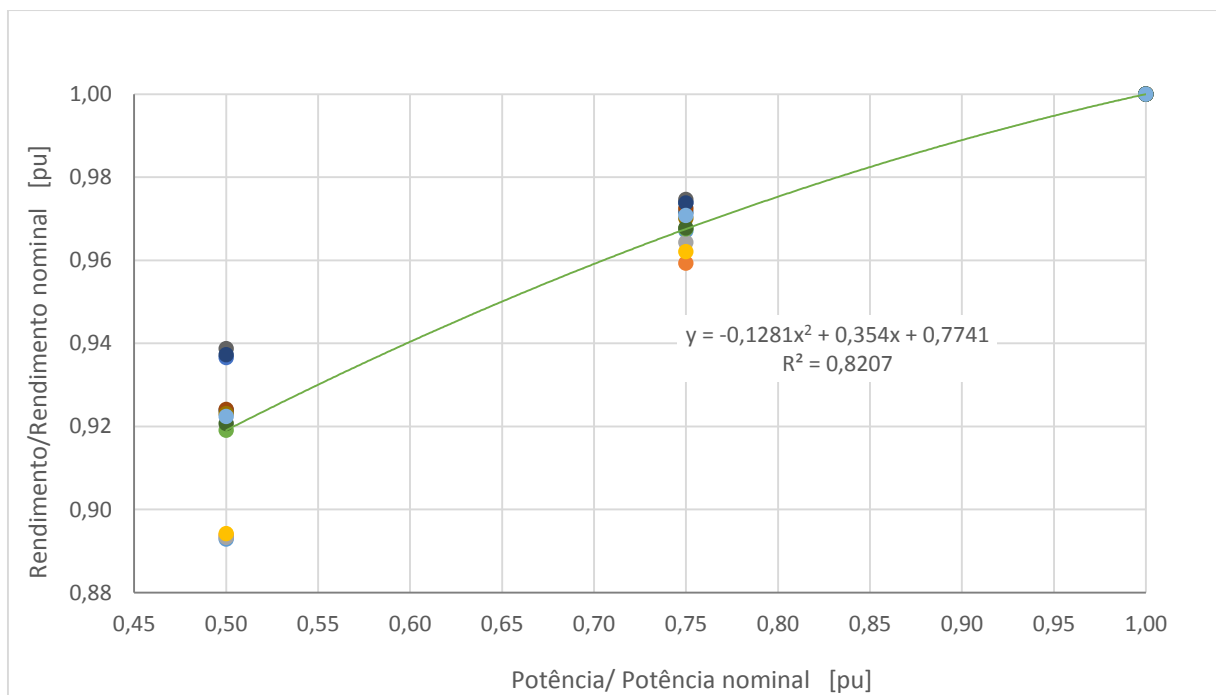


Figura III.17 – Variação do rendimento de motores com o carregamento.

#### d) Modelo dos equipamentos de refrigeração por absorção

A modelagem dos *chillers* de absorção também é feita de maneira semelhante. Primeiramente foram levantadas informações de diversos equipamentos de refrigeração por absorção abrangendo máquinas pequenas, médias e de grande porte. Foram coletados dados de equipamentos com suprimento de calor por meio de água quente, de vapor, usando gases de escape de motores de combustão ou ainda com a queima direta de gás natural; em configurações internas de simples ou de duplo efeito.

Depois disso, os valores de COP foram determinados com base na relação entre as capacidades frigoríficas nominais e os consumos reais de calor, usando as informações dos fabricantes sobre as capacidades frigoríficas e as vazões de vapor, água quente ou de combustível que são gastas pelo equipamento.

A Figura III.18 apresenta um desses modelos representando um equipamento com capacidade frigorífica igual a considerando alimentação com água quente em dois níveis de temperatura e adotando-se um COP de 1,26. Observa-se os circuitos de alimentação de água quente desse modelo é o mesmo que é utilizado para o motor a gás. Ou seja, esses equipamentos operam acoplados.

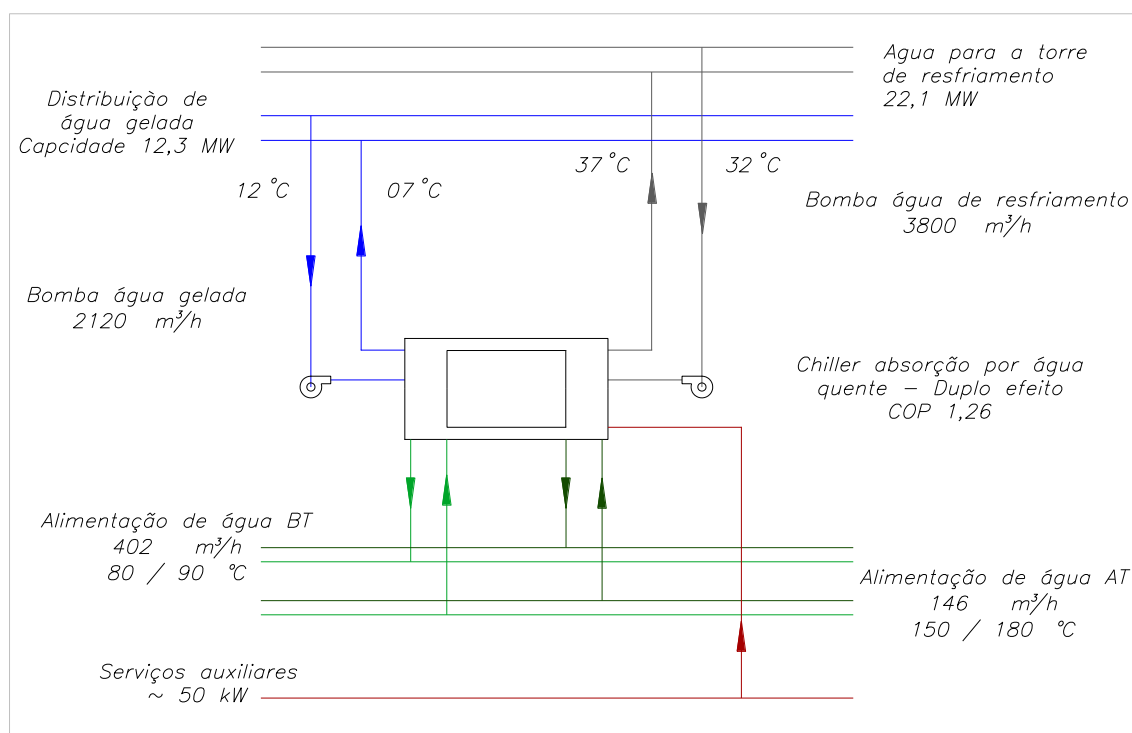


Figura III.18 – Resultado do modelo do *chiller* de absorção.

Ao contrário dos compressores e dos motores de combustão, para o caso dos *chillers* de absorção não se verifica mudança significativa no rendimento dos equipamentos com o aumento da capacidade dos equipamentos. Para mesmo tipo de máquina de absorção o rendimento é praticamente constante com o aumento do porte.

O que se verificou foram rendimentos diferentes para máquinas com distintas configurações de alimentação de calor. A Tabela III.5 apresenta esses resultados. O valor

indicado COP1 é a média encontrada para os equipamentos da amostra. COP2 é o valor máximo verificado no levantamento.

Tabela III.5 – Coeficientes de performance para *chillers* à absorção.

| Num. | Tipo de arranjo                              | COP <sub>1</sub> | COP <sub>2</sub> |
|------|--|------------------|------------------|
| 1    | Água quente 90,6 / 85,0 °C, simples efeito   | 0,61             | 0,82             |
| 2    | Água quente 90,0 / 80,0 °C, simples efeito   | 0,63             | 0,76             |
| 3    | Água quente 130,0 / 100,0 °C, simples efeito | 0,66             | 0,66             |
| 4    | Vapor 1,5 bar, simples efeito                | 0,67             | 0,72             |
| 5    | Gases de escape e água quente, duplo efeito  | 0,97             | 1,05             |
| 6    | Gás natural, duplo efeito                    | 1,18             | 1,34             |
| 7    | Água quente 176,7 / 162,8 °C, duplo efeito   | 1,19             | 1,25             |
| 8    | Água quente, 175,0 / 160,0 °C, duplo efeito  | 1,27             | 1,32             |
| 9    | Gases de escape, duplo efeito                | 1,37             | 1,43             |
| 10   | Vapor 8,0 bar, duplo efeito                  | 1,61             | 1,77             |

As máquinas de refrigeração por absorção têm a característica de possuírem menor sensibilidade às variações de carregamento. O rendimento é alterado em menores proporções se comparadas a outros tipos de equipamento. Os fabricantes apresentam informações em seus catálogos (THERMAX EUROPE, 2008), uma delas é a curva que está reproduzida na Figura III.19. Foram ajustados alguns pontos e determinou-se uma equação. Ela foi implementada no modelo empregado para o *chiller* de absorção de modo a considerar a variação do carregamento do equipamento fazendo os ajustes necessários no valor do rendimento.



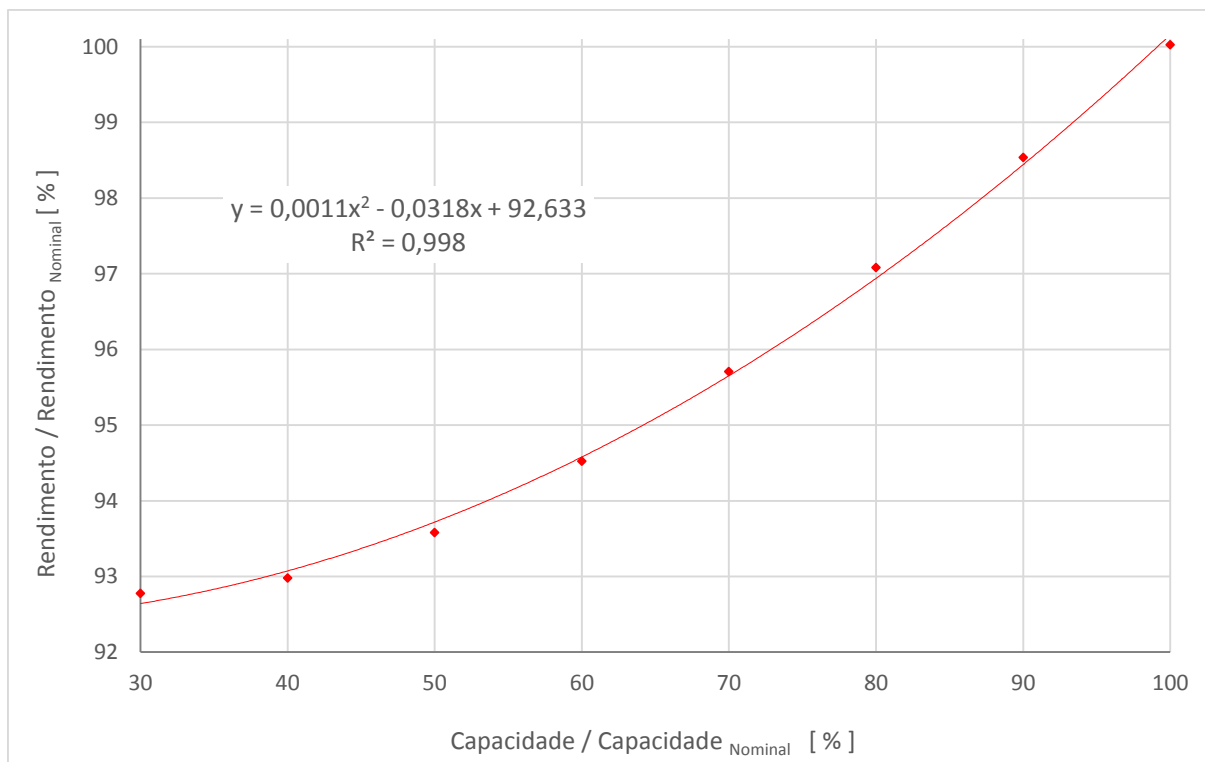


Figura III.19 – Rendimento pelo carregamento em *chillers* de absorção.

### III.4 - Planilha de cálculo

Após a determinação das cargas térmicas de ar condicionado passíveis de serem substituídas e de posse dos modelos mostrados anteriormente são realizados os cálculos energéticos. Para isso foi desenvolvida uma planilha para acelerar essa tarefa. Ela realiza basicamente os seguintes passos:

- Seleção do tipo de cálculo para os rendimentos dos diversos equipamentos, isto é, eles serão inseridos manualmente ou calculados de forma automática e se eles serão considerados com os valores fixos ou variáveis, de acordo com as mudanças no carregamento.
- Seleção do tipo de cálculo para a estimativa da capacidade e da quantidade de máquinas. Também pode-se optar em fazer de forma manual ou de maneira automática. Quando é automática, com base no valor mínimo da carga e no limite operacional dos equipamentos determina-se a capacidade unitária do equipamento. Depois, assumindo que os equipamentos serão do mesmo porte, a partir da carga máxima, calcula-se a quantidade de máquinas, respeitando 50% como o carregamento mínimo recomendado



- para a operação de motores para evitar o espelhamento das camisas (CATERPILLAR, 2015).
- c) Selecionar o tipo de tarifação adotada e inserir as informações sobre o horário de ponta do adotado pela concessionária de energia elétrica do local onde a análise está sendo feita.
  - d) Determinar o montante mensal de energia elétrica consumido pelo sistema convencional, aquele que atende simultaneamente as cargas elétricas e as correspondentes cargas térmicas de ar condicionado, considerando todos os segmentos da tarifa de energia elétrica.
  - e) Estabelecer o modo de operação da central, ou seja, se ela opera na base com uma carga constante ou então em paridade. E se for assim, se em paridade térmica ou elétrica.
  - f) Escolher se a central irá operar com acumulação de gelo. Caso sim, devem ser adotados parâmetros para o funcionamento dessa reserva.
  - g) Calcular os montantes de energia para a situação proposta. Considerando a compra do gás natural e que poderão existir excedentes de energia térmica ou elétrica, dependendo do modo de operação e dos valores adotados. Todos os cálculos são elaborados para depois considerar as diferentes tarifas de energia.

Para a eletricidade, determinam-se todos os valores para as demandas de potência e de consumo de energia para os dois de ponta e fora de ponta, levando em consideração a importação da energia da concessionária e a exportação como venda de excedentes. Para o gás natural calcula-se somente o consumo durante o intervalo de tempo que foi considerado.

A Figura III.20, mostra como é o aspecto da primeira aba da planilha que foi desenvolvida para ser usada nesse trabalho.

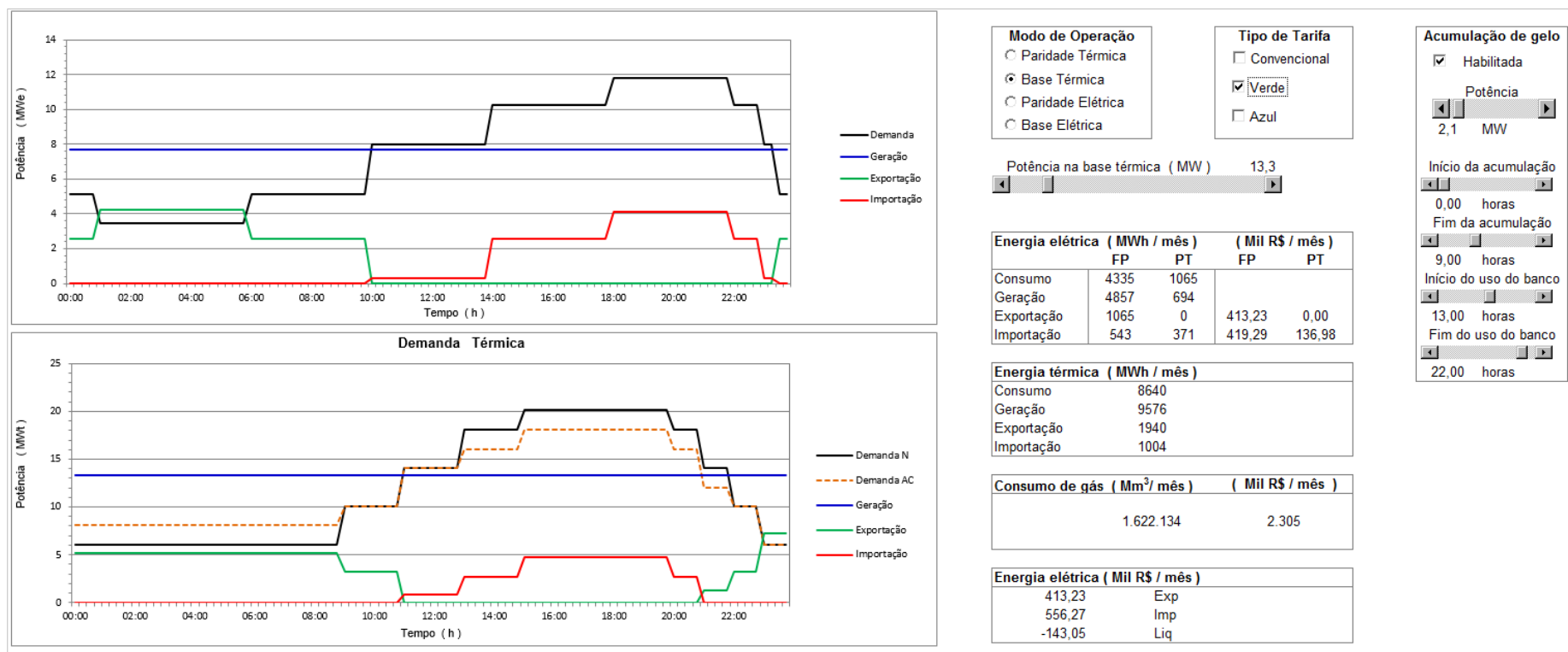


Figura III.20 – Planilha desenvolvida para o trabalho.

A planilha também possibilita modificar e variar continuamente diversos parâmetros mediante a inserção de novos valores ou então usando os botões de correr e de opção que ficam dispostos nas caixas de controle mostrados na parte de cima à direita.

Além dos resultados energéticos também já são calculadas as despesas com a energia. Para isso já estão inseridas as tarifas de comercialização da concessionária de energia elétrica da região, a AES Eletropaulo, conforme a resolução mais recente da ANEEL, já considerando as novas bandeiras de consumo. A Tabela III.6 apresenta um resumo com os principais valores praticadas. Para este trabalho adotou-se que os consumidores pertencem ao subgrupo A4, atendidos em média tensão. Se forem usadas outras características, como conexão em outros níveis de tensão, por exemplo, esses valores têm que ser adaptados.

Tabela III.6 – Tarifas de energia elétrica da AES Eletropaulo.

| Tarifas de uso do sistema de distribuição e de energia para a AES Eletropaulo |          |       |           |        |           |        |        |        |        |        |
|---|----------|-------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Classe  | TUSD     |       |           |        | TE        |        |        |        |        |        |
|   | R\$ / kW |       | R\$ / MWh |        | R\$ / MWh |        |        |        |        |        |
|   | FP       | P     | FP        | P      | FP        | P      | FP     | P      | FP     | P      |
| <b>Conv.</b>  | 14,64    | 14,64 | 58,26     | 58,26  | 200,02    | 200,02 | 225,02 | 225,02 | 255,02 | 255,02 |
| <b>Verde</b>  | 8,08     | 8,08  | 69,41     | 385,16 | 190,91    | 312,99 | 215,91 | 337,99 | 245,91 | 367,99 |
| <b>Azul</b>   | 8,17     | 13,07 | 70,19     | 70,19  | 190,91    | 312,99 | 215,91 | 337,99 | 245,91 | 367,99 |

Fonte: Resolução Aneel nº 1858 de 02 março de 2015.

As tarifas para a compra do gás natural da concessionária, a Comgás, também foram inseridas nessa planilha e estão atualizadas com as resoluções da agência reguladora. Os valores utilizados estão mostrados na Tabela III.7. Para enquadramento na concessionária de gás natural, considerou-se que as futuras centrais serão instalações de cogeração para consumo próprio ou venda para consumidor final.

Observa-se que faturamento do consumo de gás natural é feito usando-se uma parcela fixa e outra variável com o consumo, em diversas faixas.



Tabela III.7 – Tarifas para compra de gás natural da Comgás.

| Faixa | Faixas de consumo de gás natural |                    | Custo fixo           | Custo variável       | Custo total          |
|-------|----------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|       | de m <sup>3</sup>                | até m <sup>3</sup> | R\$ / m <sup>3</sup> | R\$ / m <sup>3</sup> | R\$ / m <sup>3</sup> |
| 1     | 0                                | 5.000              | 0,961068             | 0,852670             | 1,813738             |
| 2     | 5.000                            | 50.000             | 0,961068             | 0,669615             | 1,630683             |
| 3     | 50.000                           | 100.000            | 0,961068             | 0,576453             | 1,537521             |
| 4     | 100.000                          | 500.000            | 0,961068             | 0,437890             | 1,398958             |
| 5     | 500.000                          | 2.000.000          | 0,961068             | 0,452657             | 1,413725             |
| 6     | 2.000.000                        | 4.000.000          | 0,961068             | 0,409718             | 1,370786             |
| 7     | 4.000.000                        | 7.000.000          | 0,961068             | 0,358510             | 1,319578             |
| 8     | 7.000.000                        | 10.000.000         | 0,961068             | 0,307292             | 1,268360             |
| 9     | 10.000.000                       |                    | 0,961068             | 0,254890             | 1,215958             |

Fonte: Resolução Arsesp 534 de 10/12/2014 e vigência em 12/12/2014

## Capítulo IV - ANÁLISE DO USO

Os primeiros resultados apresentados nesse trabalho foram obtidos a partir da análise dos questionários aplicados pela Comgás. Eles serão usados nas atividades posteriores, servindo para balizamento e verificação do estudo de caso.

### IV.1 - Levantamento de Ar Condicionado

A partir da análise dos dados dos questionários foi possível extrair resultados importantes para o conhecimento da aplicação e operação dos sistemas de ar condicionado. Principalmente para o setor de prédios e condomínios de escritórios, que forma a grande maioria dessa amostra, constituindo mais de 90% dos imóveis que foram pesquisados. A Figura IV.1 detalha essa amostra fazendo uma estratificação nas regiões pesquisadas.

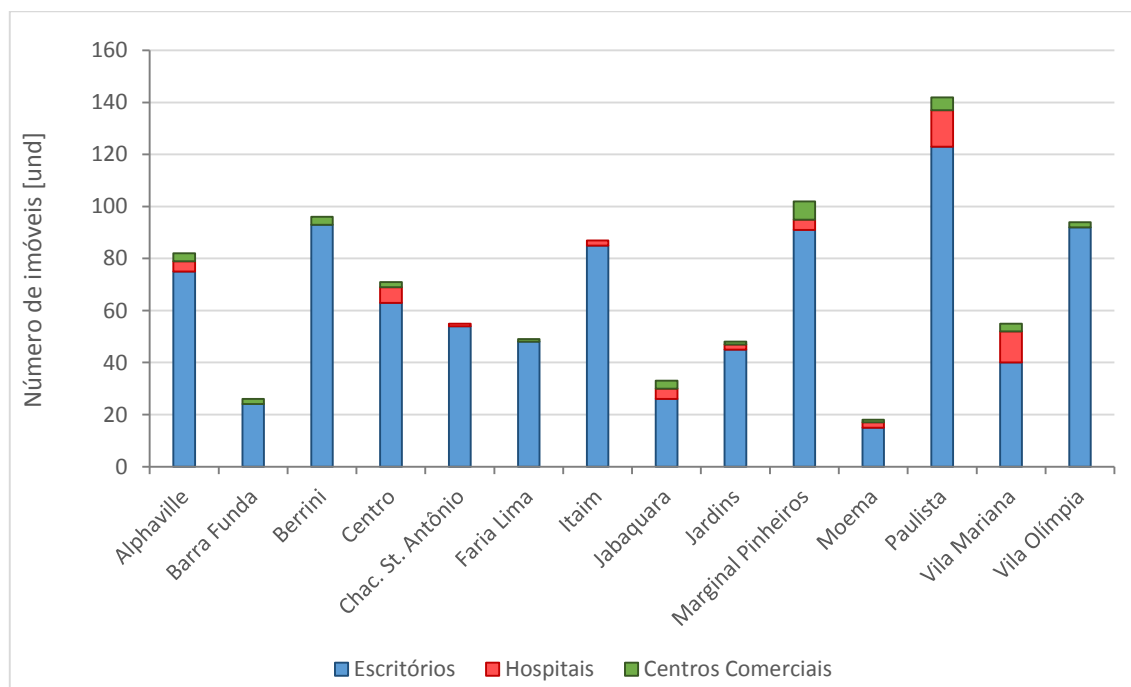


Figura IV.1 – Distribuição dos tipos de imóveis por região.

Antes de serem analisados os dados dos questionários foram consistidos com relação à existência e qualidade das informações. Da amostra total não foi possível utilizar 424 questionários, cerca de 44% do total, já que continham erros ou informações conflitantes. A

Figura IV.2 mostra a porcentagem dos questionários considerados válidos em cada região em que o levantamento foi realizado.

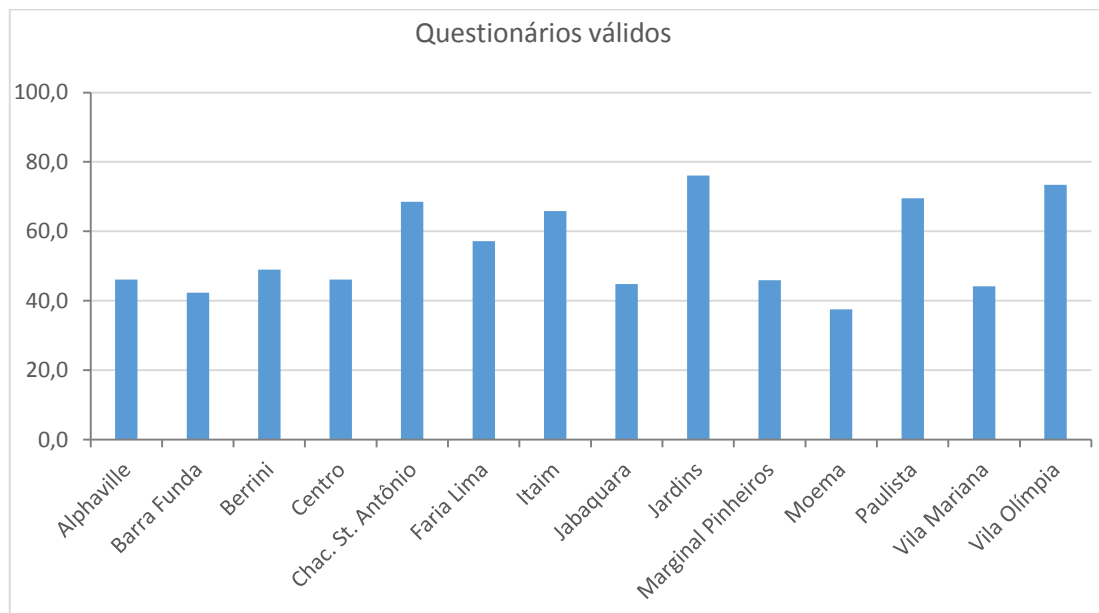


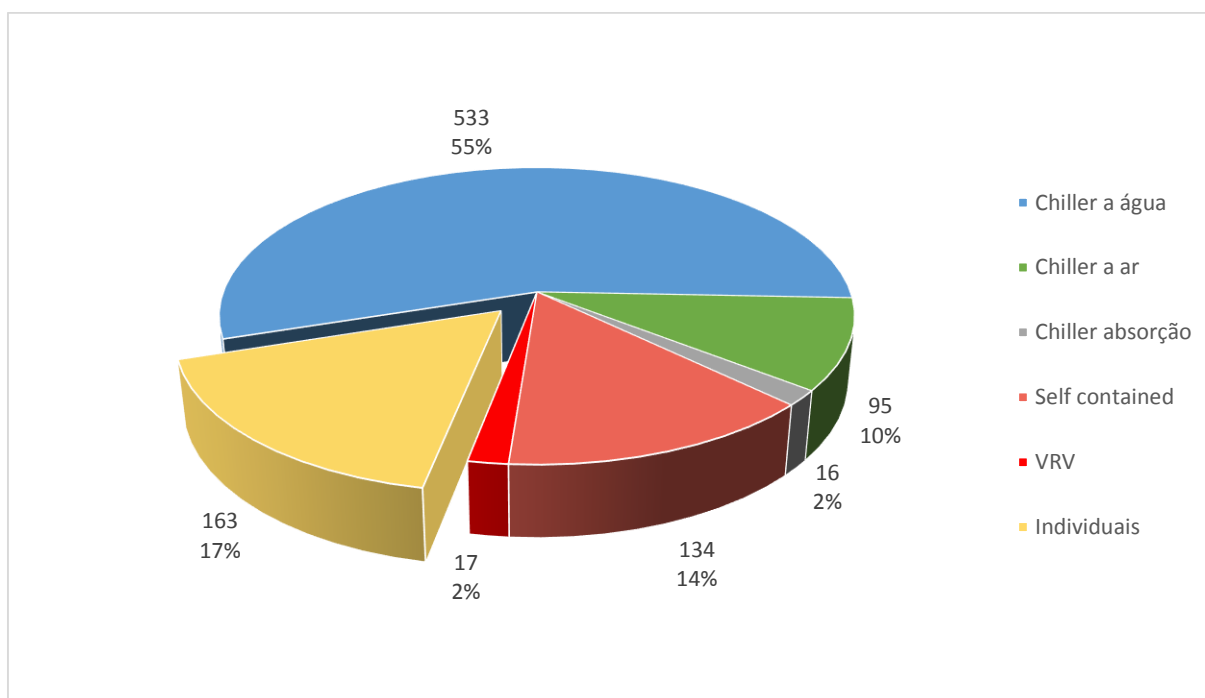
Figura IV.2 – Porcentagem de questionários válidos por região.

Nessa amostra não foram considerados os hospitais e centros comerciais. No primeiro caso, os dados não foram suficientes para completar as análises, pois para todos eles faltaram informações ou dados importantes tais como a capacidade instalada ou área útil. No caso dos centros comerciais, optou-se em não fazer a análise por causa da disparidade das áreas ocupadas, dos tipos de imóveis e pela pequena quantidade de imóveis desse tipo, apenas 4% dos imóveis que foram pesquisados.

A partir dos dados desse levantamento foi possível visualizar de forma clara a aplicação do ar condicionado, principalmente para o setor de escritórios. Além disso, as análises propiciaram alguns resultados interessantes, que estão listados a seguir

- a) Aproximadamente 17% do setor de escritórios utiliza as necessidades de ar condicionado utilizando equipamentos individuais. Quase a totalidade desses equipamentos é formada por aparelhos do tipo Split. Os aparelhos de janela estão sendo abandonados, principalmente por causa do maior ruído. Não foi possível quantificar a capacidade instalada, no entanto, esses imóveis totalizam mais de 900.000 m<sup>2</sup> de área útil.

- b) O restante da amostra dos prédios e condomínio de escritórios, cerca de 83%, utiliza equipamento centralizado para os seus sistemas de ar condicionado. Dos equipamentos centralizados, mais de 80%, é constituída por *chillers* para a produção de água gelada. Os restantes são equipamentos do tipo *self-contained* ou VRV.



Fonte: Levantamento de Ar Condicionado - Comgás

Figura IV.3 – Tipos de equipamentos observados.

- c) Quanto a idade informada para os equipamentos, verificou-se que aproximadamente 25% da amostra tem mais que 15 anos e que 12% desses equipamentos mais de 20 anos. A
- d) Figura IV.4 apresenta esses dados na forma de quantidades e como porcentagens acumuladas.



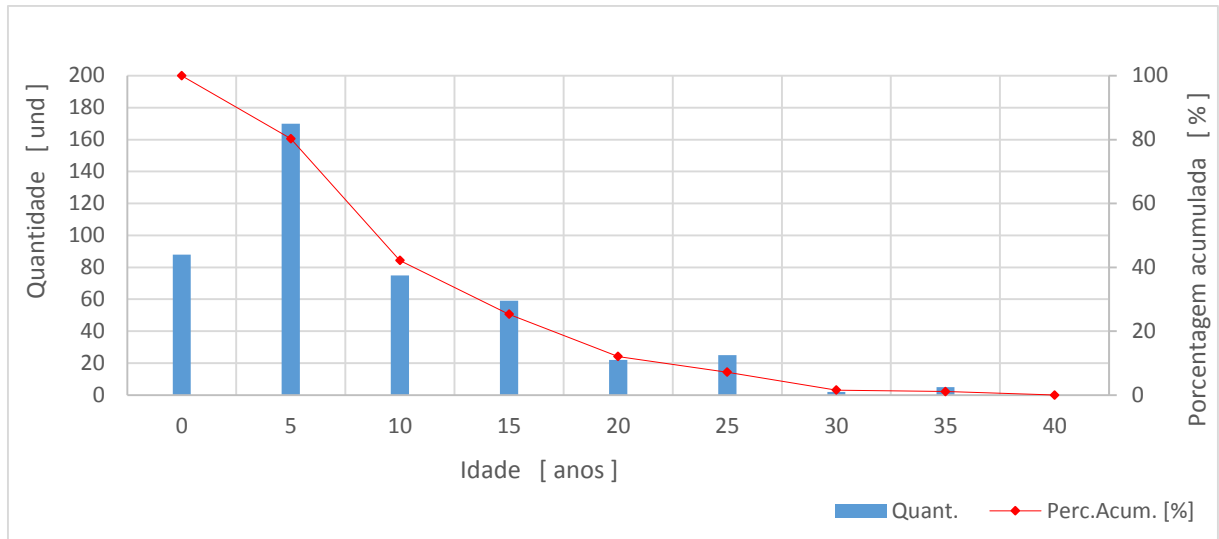


Figura IV.4 – Idade dos equipamentos de ar condicionado.

Considerando apenas os escritórios, o valor médio da relação carga térmica instalada em ar condicionado pela área útil é igual a  $0,204 \text{ kW/m}^2$ . Para os centros comerciais esse valor é igual a  $0,171 \text{ kW/m}^2$ . A Figura IV.5 e a Figura IV.6 apresentam gráficos esses valores em cada uma das regiões do levantamento, para os escritórios e centros comerciais, respectivamente.

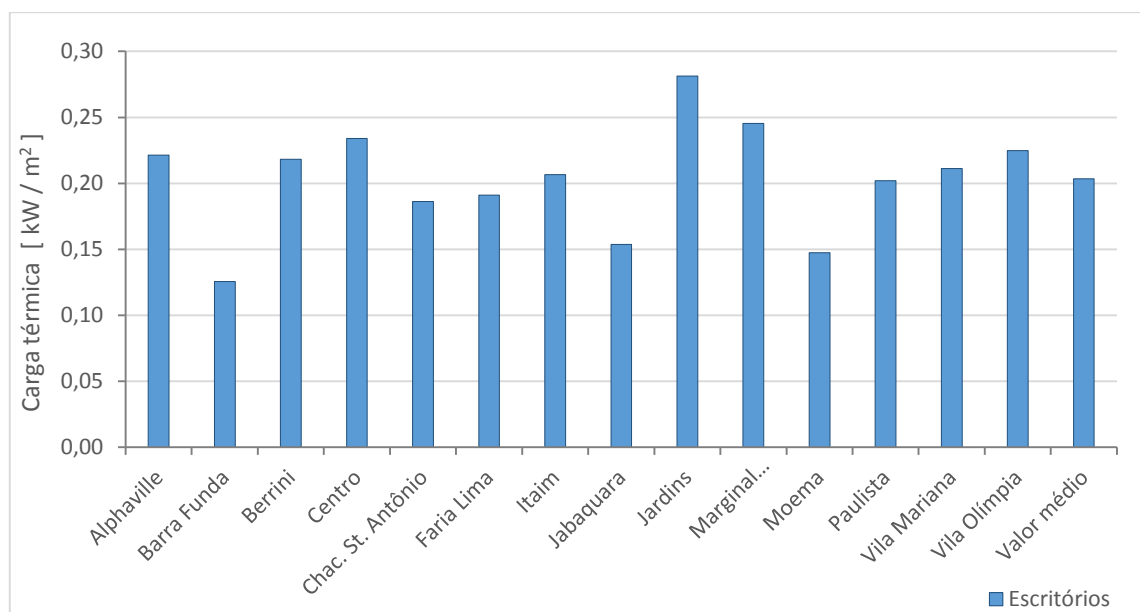


Figura IV.5 – Carga térmica unitária nos escritórios.

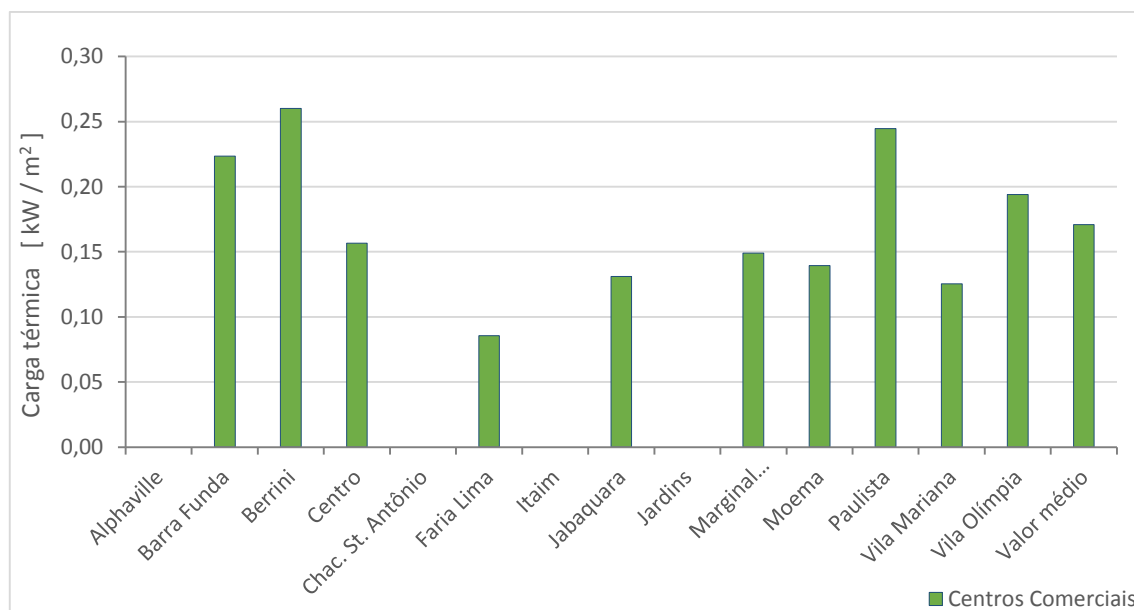


Figura IV.6 – Carga térmica unitária nos centros comerciais.

Observa-se que a carga térmica específica calculada encontrada para os escritórios tem um valor com menor dispersão em relação ao valor médio. Os dois maiores resultados que foram encontrados, para imóveis situados nos Jardins e na Marginal do Pinheiros, podem ser explicados pelo tipo de prédio que é dominante na região, ou seja, prédios altos, de padrão elevado e com grandes áreas envidraçadas nas fachadas.

Para os centros comerciais a mesma carga térmica por área apresenta uma variação bem mais acentuada. Isso pode se explicar pela diversidade de tipos de imóveis e pelo tamanho da amostra, que é muito menor.

## ***Capítulo V - RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO***

Nesse capítulo são sintetizados os resultados obtidos no estudo de caso que já foi comentado na metodologia. Primeiramente é mostrada a localização de cargas de resfriamento usando o método de imagens e em seguida é feita a seleção e o ordenamento para a localização das centrais de cogeração que foram indicadas para o atendimento das demandas de ar condicionado que foram anteriormente localizadas.

### ***V.1 - Localização das Cargas de Resfriamento***

Como outros meios não estavam disponíveis, a localização das cargas de resfriamento para climatização foi efetuada manualmente usando imagens do Google Earth. Como explicado anteriormente, adotam-se valores de área e consumo para cada um dos tipos de imóvel observado e resulta consumo mensal total que foi estimado, como mostrado na Tabela III.1, a seguir. Na Figura V.1 é possível observar a quantidade e densidade de imóveis que foram analisados durante o levantamento.

Tabela V.1 - Unidades consumidoras identificadas e consumo estimado.

| <b>Tipo de imóvel</b> | <b>Quantidade observada</b> | <b>Consumo total [MWh/mês]</b> |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Casa pequena          | 1.264                       | 632                            |
| Casa média            | 6.186                       | 6.186                          |
| Casa grande           | 3.734                       | 7.468                          |
| Prédio pequeno        | 2.139                       | 42.780                         |
| Prédio médio          | 2.131                       | 106.550                        |
| Prédio grande         | 152                         | 12.160                         |
| <b>Totais</b>         | <b>15.606</b>               | <b>175.776</b>                 |



Fonte: Google Earth

Figura V.1 – Imóveis observados mostrados durante o levantamento.

Observa-se que o consumo total estimado para desses imóveis é um valor próximo de 175,8 GWh/mês. Usando os gráficos da Figura V.2 e da Figura V.3 verifica-se, entretanto, que na área de interesse foi identificada uma grande quantidade de casas pequenas e médias, mas o consumo de energia elétrica para esse tipo de imóvel não é significativo.

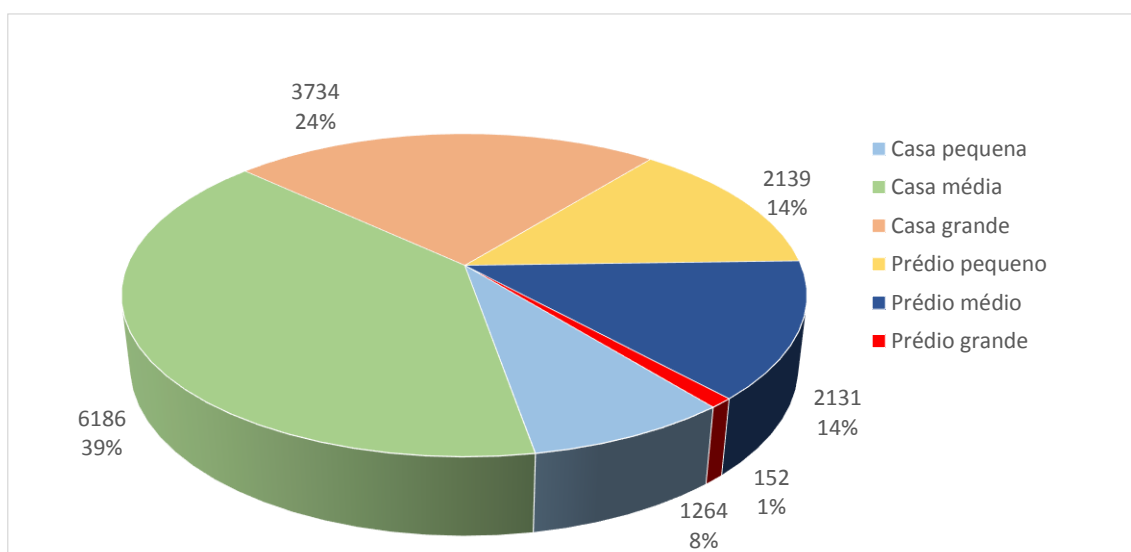


Figura V.2 – Tipos de imóveis observados no levantamento.

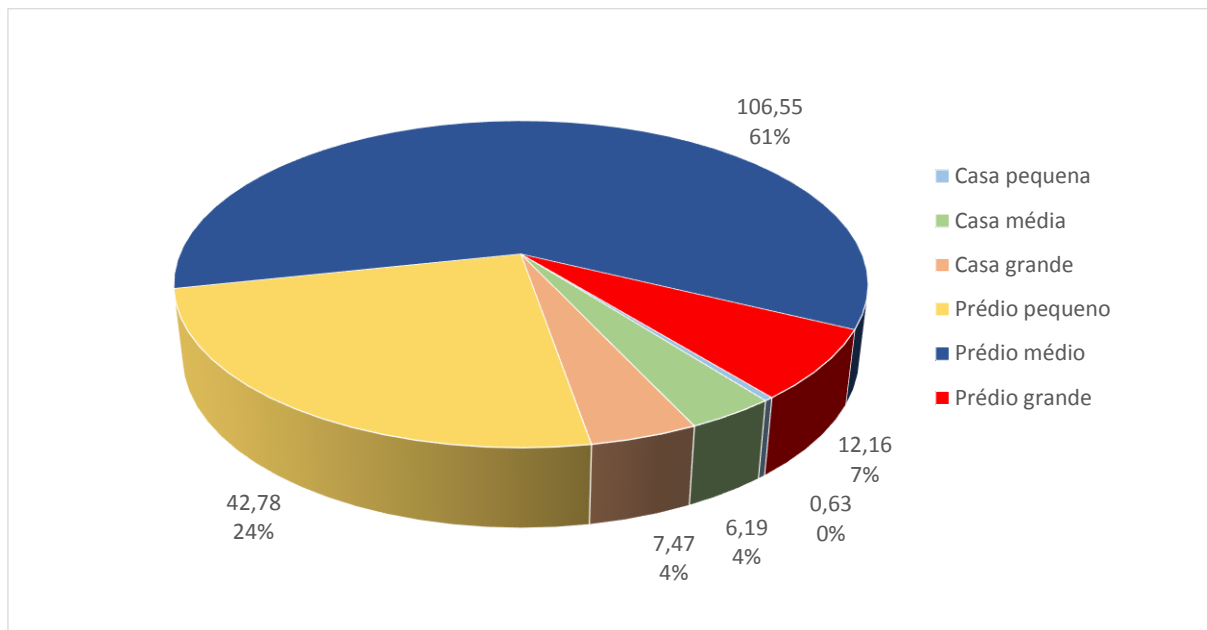


Figura V.3 – Consumo nos imóveis observados.

Como o consumo de energia elétrica das casas é muito menor que o dos prédios e o objetivo é o de se atender as maiores cargas de ar condicionado, esses imóveis não serão mais considerados no restante desse trabalho.

Desse modo, o consumo de energia elétrica avaliado somente para os prédios dessa região, que somam 4422 imóveis, é de aproximadamente 161,5 GWh/mês. Com base nos percentuais que foram assumidos anteriormente para a divisão de consumo nesse tipo de prédio, resulta que o consumo de energia elétrica gasto exclusivamente para com os sistemas de ar condicionado é da ordem de 83,8 GWh/mês.

Assumindo uma posição mais conservadora, adota-se que 20% dos prédios menores aceitem implementar as mudanças para a substituição dos sistemas convencionais para as novas centrais de cogeração e produção de água gelada. Para os prédios médios e grandes adotam-se percentagens iguais a 25% e de 30% respectivamente. Isso resulta em um potencial de economia de aproximadamente 20 GWh/mês. No entanto, como essa carga está distribuída de forma muito difusa, ela será concentrada em locais mais favoráveis para a construção dessas centrais de cogeração.

Como já foi explicado na metodologia, a localização desses 4422 prédios será transposta para uma grade com menor número de pontos, menos precisa, 2,5 x 2,5 metros, pois não há



necessidade de resolução de metro em metro. Desse modo, há um ganho de tempo no processamento.

Aplicou-se a metodologia já descrita, a Janela Móvel. O movimento dessas janelas foi feito em passos fixos iguais a 100 m e com quatro dimensões diferentes. A aplicação de cada janela, resultou em quantidades diferentes para essas centrais de cogeração.

- a) Quadrada com lados iguais a 0,5 km 85 centrais
- b) Retangular com lados iguais a 1,0 e 0,5 km 47 centrais
- c) Quadrada de com lados de 1,0 km 26 centrais
- d) Quadrada com lados iguais a 2,0 km 8 centrais.

Como exemplo, a Tabela V.2 mostra a localização e o montante de energia elétrica que é usado em ar condicionado nas 26 centrais que foram determinadas com a janela de 1,0 km.

Tabela V.2 – Coordenadas e energia das centrais de cogeração.

| Id Central | Coordenadas UTM - Sirgas 2000 - Zona 23 S |           | Consumo a ser atendido |
|------------|---|-----------|------------------------|
|            | X [m]                                     | Y [m]     | [ MWh / mês ]          |
| 1          | 329.883                                   | 7.392.651 | 2686                   |
| 2          | 330.783                                   | 7.393.551 | 2648                   |
| 3          | 330.883                                   | 7.392.151 | 2403                   |
| 4          | 328.483                                   | 7.390.551 | 2156                   |
| 5          | 331.583                                   | 7.391.551 | 1624                   |
| 6          | 331.783                                   | 7.393.951 | 1356                   |
| 7          | 331.583                                   | 7.392.651 | 1342                   |
| 8          | 330.183                                   | 7.391.651 | 1050                   |
| 9          | 329.783                                   | 7.393.351 | 1001                   |
| 10         | 329.183                                   | 7.390.751 | 543                    |
| 11         | 329.183                                   | 7.392.551 | 538                    |
| 12         | 330.883                                   | 7.393.151 | 532                    |
| 13         | 331.883                                   | 7.393.451 | 447                    |
| 14         | 328.183                                   | 7.390.251 | 438                    |
| 15         | 330.783                                   | 7.391.151 | 411                    |
| 16         | 331.083                                   | 7.393.951 | 276                    |
| 17         | 327.483                                   | 7.391.251 | 112                    |
| 28         | 331.883                                   | 7.392.551 | 96                     |
| 19         | 329.583                                   | 7.391.751 | 69                     |
| 20         | 328.483                                   | 7.392.251 | 55                     |
| 21         | 330.183                                   | 7.390.651 | 51                     |
| 22         | 328.583                                   | 7.391.551 | 34                     |
| 23         | 331.183                                   | 7.391.051 | 28                     |
| 24         | 329.583                                   | 7.393.551 | 16                     |
| 25         | 328.483                                   | 7.390.151 | 12                     |
| 26         | 327.483                                   | 7.392.251 | 3                      |

Isso também pode ser visualizado na Figura V.4.





Fonte: Google Earth

Figura V.4 – Localização das 26 maiores cargas de resfriamento.

## V.2 - Localização das Centrais de Cogeração

Estando as maiores concentrações de consumo de energia para o ar condicionado localizadas elas devem ser classificadas e hierarquizadas, pois dependendo da forma como a localização dessas cargas foi realizada, a quantidade encontrada pode ser grande e a classificação fica muito trabalhosa.

Como exemplo desse estudo de caso foi feita a classificação para as 26 cargas concentradas de resfriamento que foram determinadas no item anterior. Para isso foram preparados 5 mapas contendo:

- Áreas de restrição ambiental;
- Áreas consideradas livres para aquisição;
- Rede de distribuição de gás;
- Localização das subestações de energia elétrica;
- Custo regional para aquisição de terreno.

A Figura V.5 e a Figura V.6 mostram de forma esquemática os mapas que foram utilizados. Na realidade esses mapas são entidades do tipo *shapefile* que são inseridos em programas de GIS para possibilitar que seja feito o processamento.

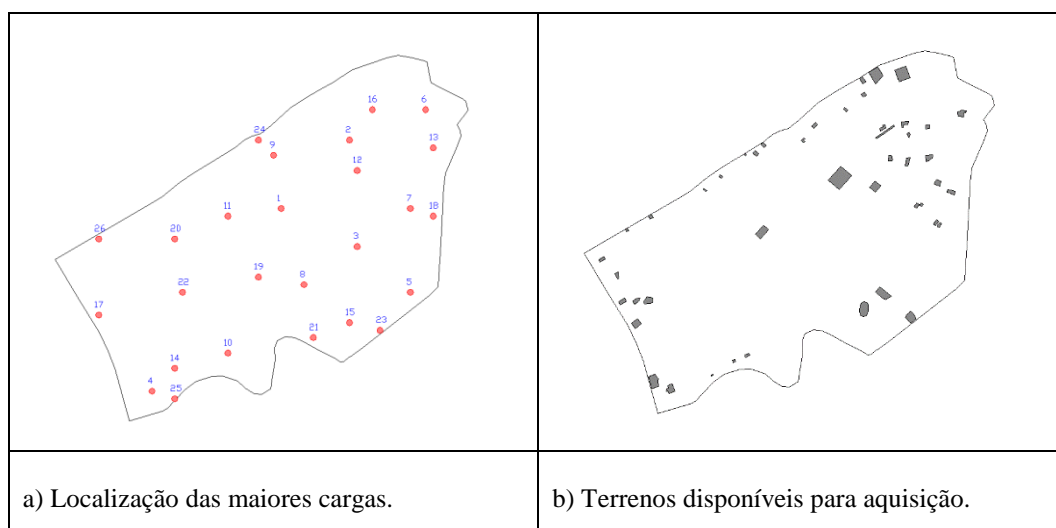


Figura V.5 – *Shapefiles* utilizados para a classificação das centrais.



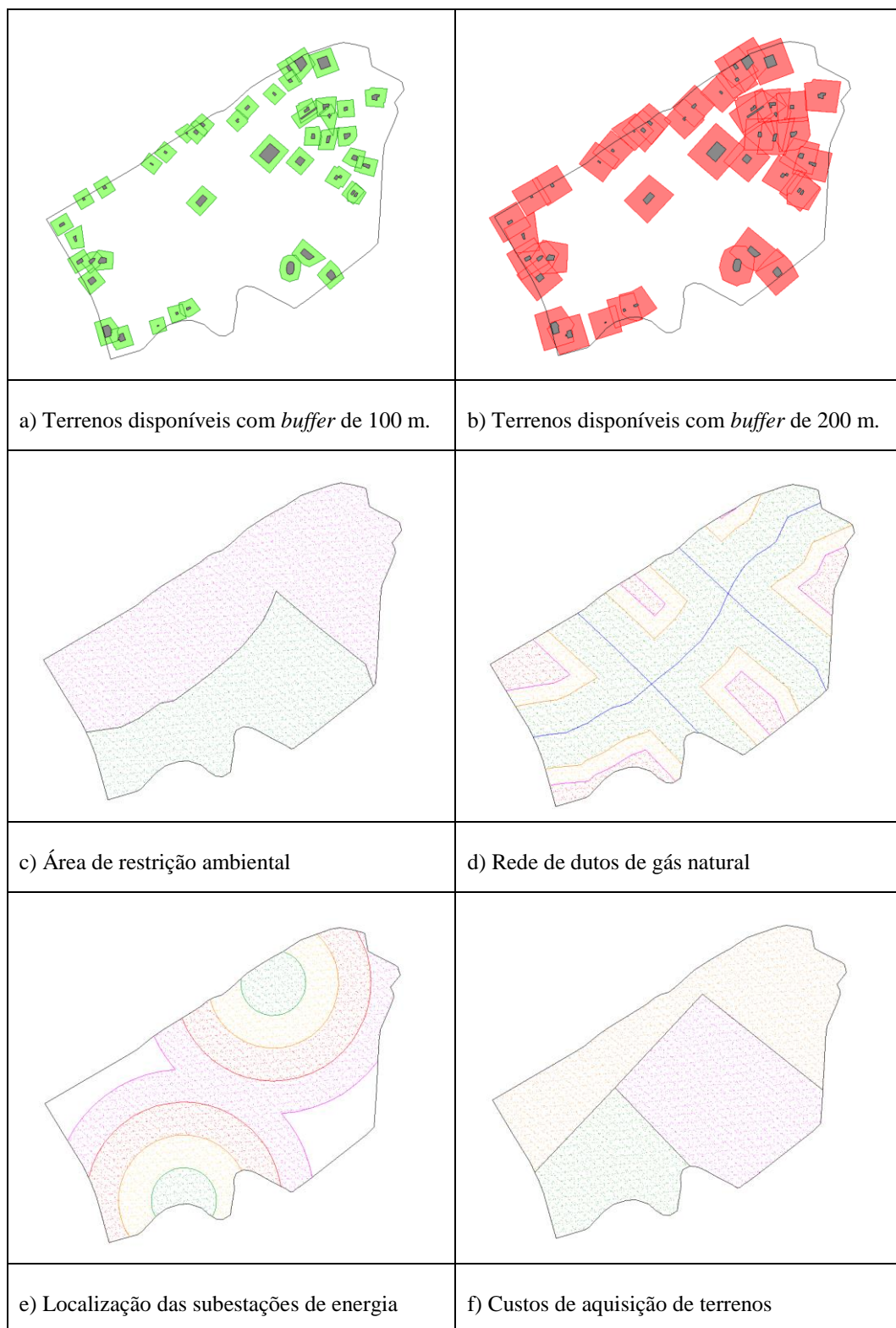


Figura V.6 – *Shapefiles* utilizados para a classificação das centrais no estudo de caso.



Esses mapas foram elaborados a partir de informações obtidas em imagens de satélites e da concessionária de energia elétrica. O mapa que foi utilizado para a rede de distribuição de gás de distribuição de gás é hipotético, pois o mesmo não pode ser disponibilizado.

Para o custo de aquisição dos terrenos a fonte consultada, o Plano Diretor da prefeitura municipal da cidade de São Paulo, indica esses custos em tabelas. Mas os valores que foram utilizados foram fictícios e usados apenas para mostrar como a método opera. Desse modo os valores terrenos foram pontuados em três níveis 0 , 1 e 2. O mesmo foi procedimento feito utilizado para o mapa de restrições ambientais. Pois no local não existem restrições ambientais na região de interesse. Mas para exemplo, uma parcela dessa área foi assim considerada.

A primeira para a classificação das cargas foi executada adotando-se os seguintes critérios:

- a) Carga concentrada de resfriamento tem que ser maior que 1000 MWh/mês;
- b) Não podem haver restrições ambientais;
- c) Área disponíveis para aquisição devem estar em um raio de 100m;
- d) Usar as centrais com as maiores cargas;
- e) Redes de gás natural tem que ser mais próximas que 500 m.
- f) Subestações tem que ser mais próximas que 1000 m;
- g) Terrenos devem estar situados locais de baixo custo de aquisição.

A tabela a seguir mostra os resultados da pontuação para os critérios que foram considerados nessa análise.

Tabela V.3 – Resultados da pontuação das centrais de cogeração.

| Num | Carga MWh/mês | Potência instalada | Restrições ambientais | Custo da terra | Distância gasoduto | Distância subestação | Áreas livres buffer 100m | Áreas livres buffer 200m |
|-----|---------------|--------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1   | 2686          | 1                  | 0                     | 0              | 2                  | 2                    | 0                        | 0                        |
| 2   | 2648          | 1                  | 0                     | 1              | 2                  | 3                    | 1                        | 1                        |
| 3   | 2403          | 1                  | 1                     | 0              | 2                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 4   | 2156          | 1                  | 1                     | 2              | 1                  | 2                    | 0                        | 1                        |
| 5   | 1624          | 1                  | 1                     | 0              | 2                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 6   | 1356          | 1                  | 0                     | 1              | 2                  | 1                    | 0                        | 1                        |
| 7   | 1342          | 1                  | 0                     | 1              | 2                  | 0                    | 0                        | 1                        |
| 8   | 1050          | 1                  | 1                     | 0              | 1                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 9   | 1001          | 1                  | 0                     | 1              | 2                  | 2                    | 1                        | 1                        |
| 10  | 543           | 0                  | 1                     | 2              | 1                  | 3                    | 0                        | 1                        |
| 11  | 538           | 0                  | 0                     | 0              | 1                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 12  | 532           | 0                  | 0                     | 1              | 2                  | 2                    | 1                        | 1                        |
| 13  | 447           | 0                  | 0                     | 1              | 0                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 14  | 438           | 0                  | 1                     | 2              | 1                  | 2                    | 0                        | 0                        |
| 15  | 411           | 0                  | 1                     | 0              | 1                  | 0                    | 0                        | 1                        |
| 16  | 276           | 0                  | 0                     | 1              | 2                  | 2                    | 0                        | 0                        |
| 17  | 112           | 0                  | 0                     | 1              | 2                  | 0                    | 1                        | 1                        |
| 18  | 96            | 0                  | 0                     | 1              | 1                  | 0                    | 0                        | 1                        |
| 19  | 69            | 0                  | 1                     | 0              | 2                  | 1                    | 0                        | 0                        |
| 20  | 55            | 0                  | 0                     | 1              | 2                  | 0                    | 0                        | 0                        |
| 21  | 51            | 0                  | 1                     | 0              | 2                  | 1                    | 0                        | 0                        |
| 22  | 34            | 0                  | 0                     | 2              | 2                  | 1                    | 0                        | 0                        |
| 23  | 28            | 0                  | 1                     | 0              | 0                  | 0                    | 1                        | 1                        |
| 24  | 16            | 0                  | 0                     | 1              | 2                  | 2                    | 0                        | 1                        |
| 25  | 12            | 0                  | 1                     | 2              | 0                  | 2                    | 0                        | 1                        |
| 26  | 3             | 0                  | 0                     | 1              | 0                  | 0                    | 1                        | 1                        |

Na primeira tentativa não houve sucesso. Os critérios de na seleção utilizados então foram novamente ajustados. Admitindo-se agora uma distância entre a carga de resfriamento e as áreas livres para aquisição de até 200 m e que essas elas pudessem ficar em terrenos de maior custo.

Satisfazendo todos os critérios de classificação, a segunda tentativa resultou em uma única central localizada nas imediações da Av. Brigadeiro Faria Lima, próximo da Av.



Juscelino Kubitschek, uma região de elevada verticalização com muitos prédios de elevado padrão e conseqüentemente com grande consumo de eletricidade e de energia térmica para climatização. Existe nas proximidades um terreno de aproximadamente 100 x 50 m que é adequado para a instalação dessa central. Esse terreno será destinado a construção de um prédio de comercial de grande porte e ele mesmo poderá ser um dos consumidores da água gelada e da energia elétrica gerada pela central. As principais características dessa central são as seguintes:

- Central número: 4
- Consumo de energia elétrica ar condicionado: 2156 MWh/mês
- Distância ao gasoduto mais próximo: 725 m
- Distância até a subestação mais próxima: 895 m
- Distância até a área livre mais próxima: 145 m

No próximo item é feita a análise energética para a central número 4.

### ***V.3 - Análise Energética da Central de Cogeração***

A central de cogeração que está sendo proposta tem por objetivo a substituição de aproximadamente 2160 MWh/mês do consumo de energia elétrica, gasta somente no atendimento da carga térmica de ar condicionado, por um consumo de gás natural. Como a central utiliza um sistema de cogeração também gera energia elétrica, um “subproduto” da central de cogeração e climatização.

Dessa forma precisamos primeiro fixar a forma de atendimento dessas duas demandas, a de resfriamento e a de eletricidade. Ou seja, definir como a central opera. Se é em paridade ou na base, e térmica ou elétrica. Nesse estudo de caso considera-se que a central irá operar em paridade térmica. Assim a energia elétrica gerada será dependente do comportamento da carga térmica. Para diminuir essa dependência e aumentar a ocupação da planta de cogeração a central de cogeração irá operar nos horários de carga térmica mais baixa (ou nula) fazendo acumulação de gelo e garantindo uma geração elétrica mínima.

Considerando que o consumo médio de energia elétrica para o ar condicionado é de 2160 MWh/mês resulta para a potência elétrica média um valor igual a 3,0 MW e supondo que valor do COP médio dos sistemas que estão sendo substituídos seja da ordem de 4,0 a carga térmica média mensal que deve ser atendida pela central de cogeração é de 8640 MWh/mês, aproximadamente 12,0 MW, cerca de 3400 TR.

Para obter os valores instantâneos de potência térmica o consumo médio de energia térmica foi distribuído sob uma curva de carga típica de um condomínio de escritórios ou de um centro comercial, onde verifica-se um aumento acentuado da demanda no período entre 14:00 e 16:00 h, no entanto, durante as madrugadas e a manhãs as demandas são bem menores.

Isso resulta na curva de carga que está mostrada na Figura V.7. O valor máximo é da capacidade frigorífica é da ordem de 20 MW e o mínimo igual é próximo de 5 MW, sem considerar operação com acumulação de gelo.

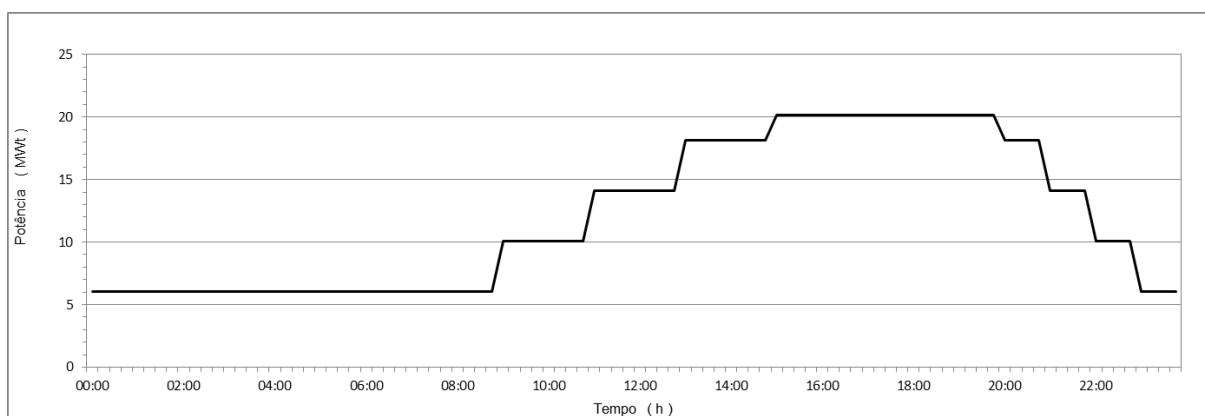


Figura V.7 – Potência térmica sem considerar acumulação de gelo.

Quando se considera a acumulação de gelo consegue-se uma redução na potência máxima. Agora o valor máximo da carga térmica é em torno de 16 MW e o mínimo é de aproximadamente 10 MW. O que resulta em uma ocupação mais conveniente para a central. Como está mostrado na Figura V.8 que segue.

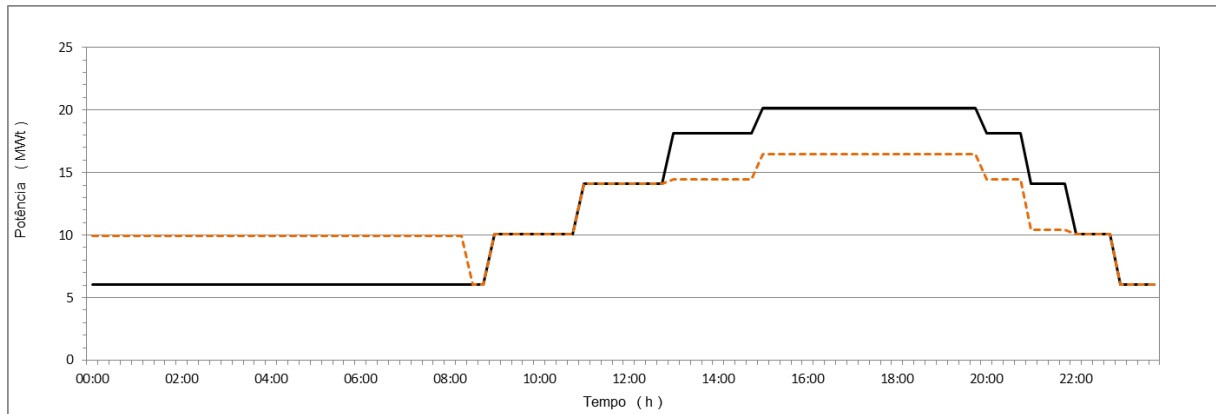


Figura V.8 – Potência térmica com acumulação de gelo.

A essa curva de demanda de energia térmica para o resfriamento corresponde uma outra curva só que é de geração de energia elétrica, associadas pelos rendimentos dos motores e pela eficiência do *chiller* de absorção.

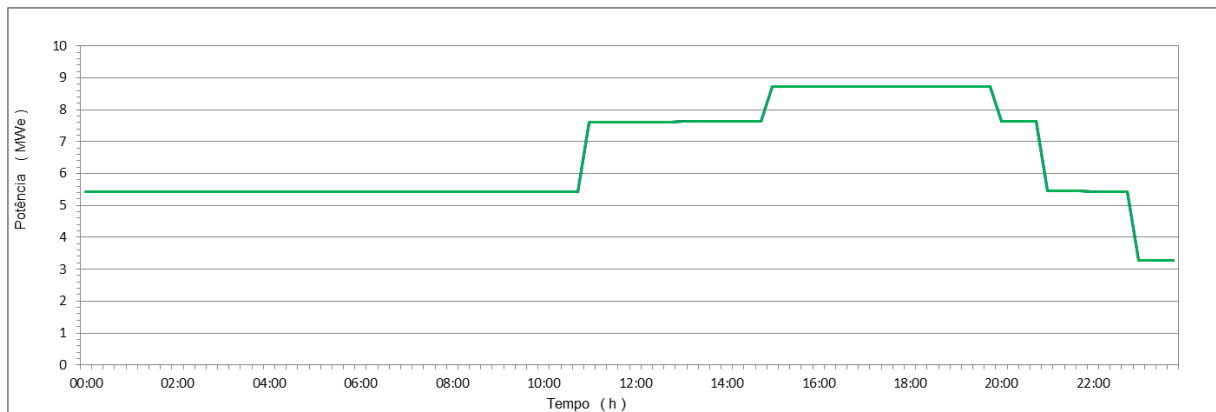


Figura V.9 – Potência elétrica no estudo de caso, com acumulação.

Considera-se essa hipótese de operação em paridade térmica e usando banco de acumulação de gelo e adotando-se rendimentos para o motor a gás de 44% e de 46%, elétricos e térmicos, respectivamente e um rendimento de 1,37 para o *chiller* de absorção, já que se trata de um equipamento de dois estágios. Foram obtidos os seguintes resultados para esse estudo de caso:

– Consumo de gás natural  $\text{m}^3$  1.762.706



|                              |     |              |
|------------------------------|-----|--------------|
| – Custo do gás natural       | R\$ | 2.504.000,00 |
| – Energia elétrica gerada FP | MWh | 5060         |
| – Energia elétrica gerada FP | MWh | 972          |

Para essa situação foi prevista então a instalação de 3 motores a gás com potência nominal de 4,0 MW acoplados a *chillers* de absorção de dois estágios e acumulação de gelo.

A central de cogeração poderá utilizar a energia elétrica gerada para o consumo próprio da empresa, evitando-se o custo da concessionária ou então, caso existam excedentes, fazendo a sua exportação para clientes livre ou para a concessionária de energia elétrica. Para esse modo de operação não há excedentes de energia térmica.

Outros arranjos e configurações podem ser analisados para alcançar a otimização da planta. Mas para esse estudo de caso, são esses valores que serão utilizados na análise de viabilidade econômica do próximo item.

Para ilustração foram desenhados três diagramas de Sankey mostrando o funcionamento na situação convencional, Figura V.10, na situação proposta com a planta operando em paridade térmica, na Figura V.11, e na Figura V.12 está mostrada o diagrama da situação proposta, mas operando em paridade elétrica.



### SITUAÇÃO CONVENCIONAL

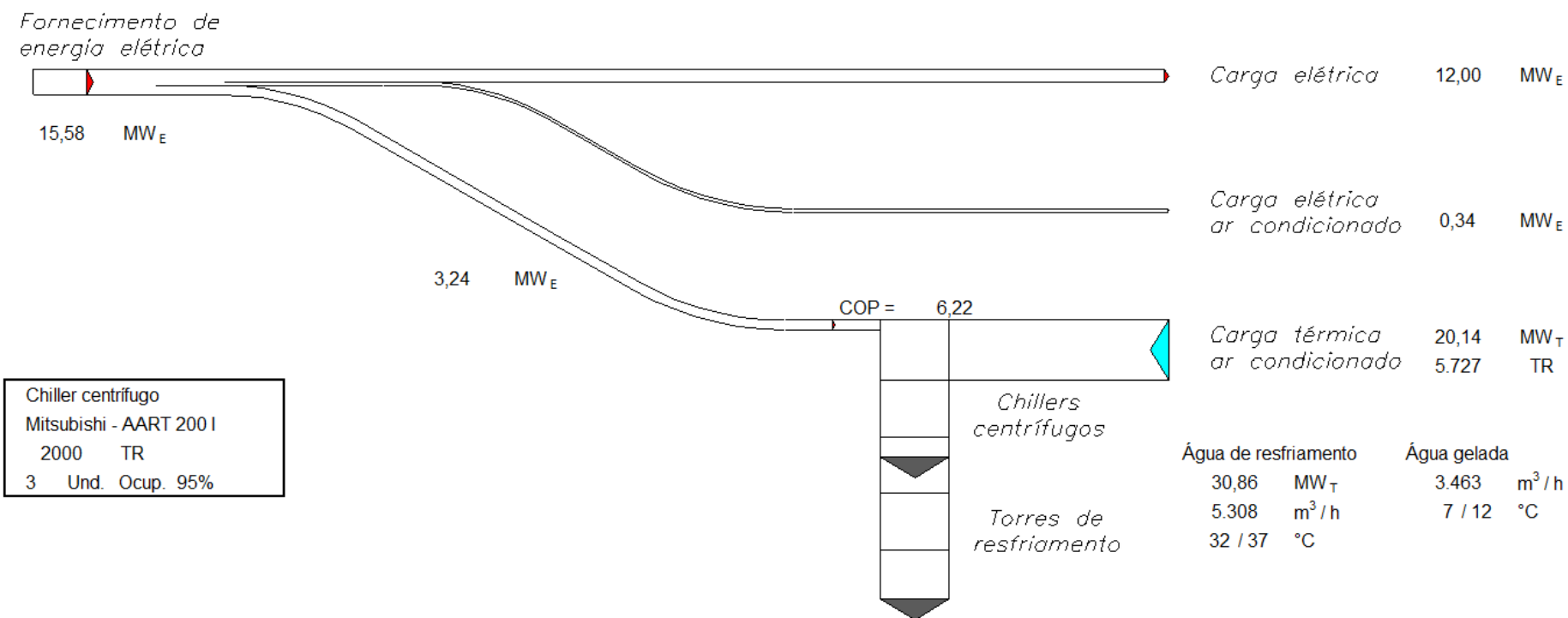


Figura V.10 – Diagrama de Sankey para a situação convencional.





**SITUAÇÃO PROPOSTA - PARIDADE TÉRMICA**

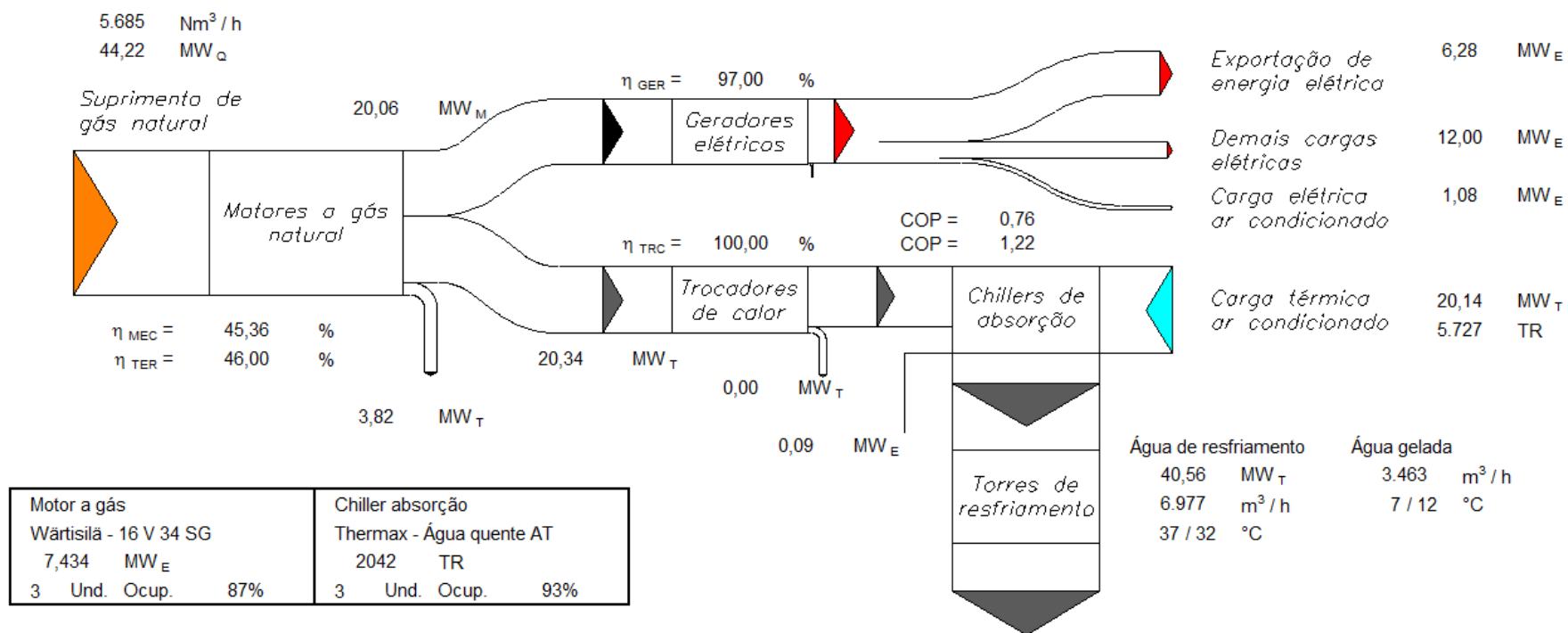


Figura V.11 – Diagrama de Sankey, situação proposta em paridade térmica.



**SITUAÇÃO PROPOSTA - PARIDADE ELÉTRICA**

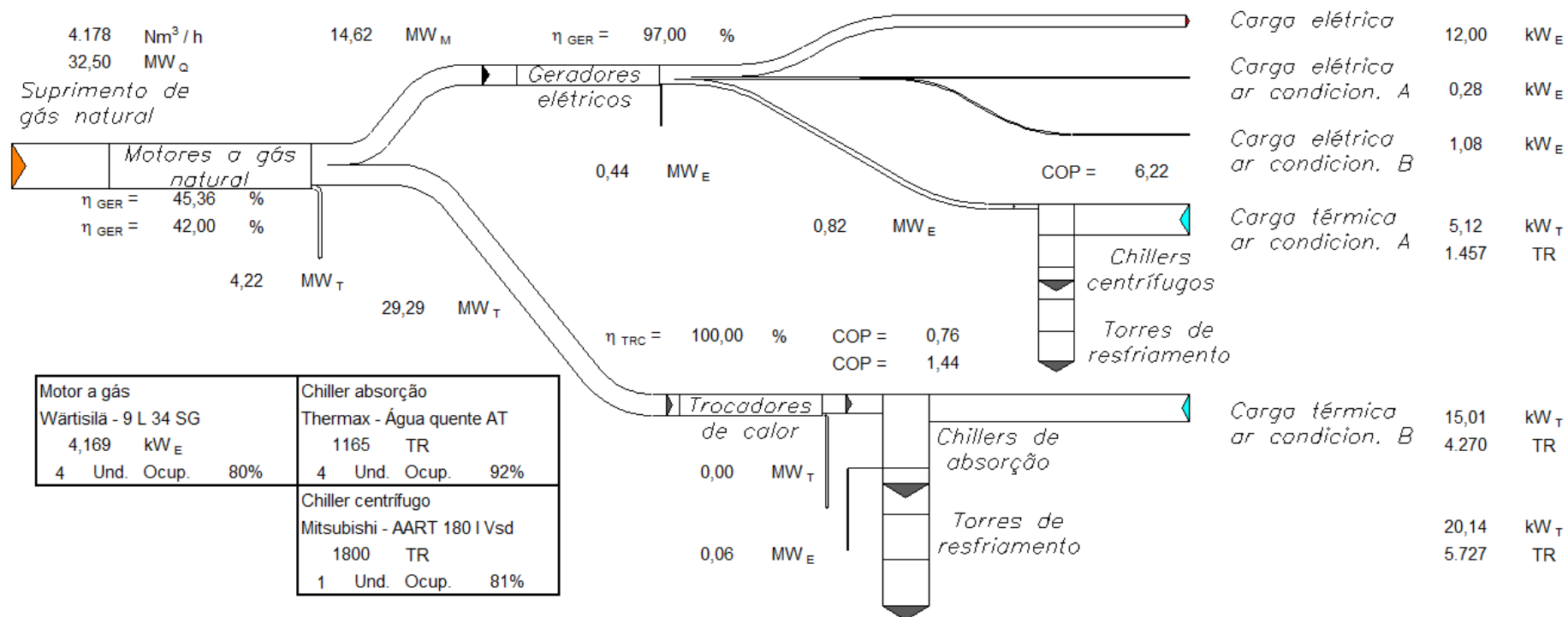


Figura V.12 – Diagrama de Sankey, situação proposta em paridade elétrica.

## ***V.1 - Análise de Viabilidade Econômica***

A análise econômica para esse estudo de caso será elaborada considerando as seguintes premissas:

- Será feito um cálculo simplificado determinando a VPL e TIR da central de cogeração.
- Para o custo dos equipamentos considera-se valores unitários obtidos na literatura (ENGLEMAN, 2005) para equipamentos desse porte. Usando taxa de câmbio de igual a US\$ 1,00 = R\$ 3,10 obteve-se os valores de R\$ 306/kW para *chillers* de absorção e R\$ 220/kW para os convencionais centrífugos e R\$ 580/kW para os grupos motores geradores a gás.
- Para considerar os custos da implantação do sistema de distribuição de água gelada foram utilizados custos indicados em (IEA – 1999), convertidos e atualizados para a moeda corrente. O valor resultante para tubos de 800 mm de diâmetro, incluindo a escavação, instalação e isolamento é de R\$ 3200,00/m. Como essa central considera uma janela móvel de 1,0 km, adotou-se um comprimento de 2,0 km para levar em conta os dutos de retorno.
- Utilizou-se uma taxa de desconto de 8,0% aa e que o investimento seja inteiramente alavancado. A carência considerada foi de 2 anos, com prazo de depreciação de 10 anos e vida de 30 anos.
- A energia elétrica produzida pela central de cogeração será inteiramente comercializada considerando um valor de venda igual a R\$ 388,00 por MWh, valor corrente nos últimos leilões do mercado de energia elétrica.
- Consideram-se impostos de 39,15% somando as parcelas relativas ao imposto de renda, PIS, Cofins e Pasep.

O fluxo de caixa foi montado considerando um investimento de R\$ 4.890.000 para os *chillers* e de R\$ 6.960.000 para os motores. O investimento total considerado é soma desses dois valores acrescida dos custos de transporte e de montagem. Adotou-se um valor fixo de 20% para essas despesas.



A energia gerada é comercializada e considera-se o custo evitado com a compra da energia elétrica que seria gasta para atender a demanda de resfriamento usando um sistema convencional. Os resultados obtidos nessa análise são os seguintes:

- Valor presente líquido – VPL           R\$ 80.931.000,00
- Taxa interna de retorno – TIR           14,1 %

Mantendo-se todos os valores constantes, valor do VPL passa a ser negativo quando a tarifa de venda da energia estiver abaixo de R\$ 236,00 / MWh. Mantendo a tarifa constante e variando-se a taxa de juros, isso ocorre para taxas de juros maiores que 9,5% aa.

## ***Capítulo VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES***

Esse trabalho conduz a diversas conclusões e recomendações importantes. As primeiras delas são relativas ao levantamento que foi realizado pela Comgás. Depois são mostradas as conclusões e recomendações que foram sendo colhidas durante o restante do trabalho.

### **Levantamento de Ar Condicionado**

- a) O setor de escritórios é um grande consumidor de energia voltada com o condicionamento dos recintos, a exigindo sua aplicação para manter as condições de conforto humano. Geralmente são prédios modernos com padrão elevado de arquitetura e construção, mas que usam em demasia fachadas de vidro que acarretam elevadas cargas térmicas
- b) A maior parte desses prédios utiliza sistemas centralizados, no entanto, cerca de 17% ainda utiliza sistemas individuais, geralmente do tipo Split. Isso equivale, tipicamente, a uma carga térmica em torno de 36 MW ou a uma potência instalada de aproximadamente 10 MW e que, em tese, poderia ser substituída por sistemas centralizados mais eficientes, ou então, como se propõe nesse trabalho, atendida por centrais de cogeração. E são justamente esses equipamentos os candidatos a serem substituídos pelas centrais propostas nesse trabalho.
- c) Verificando-se a idade dos equipamentos de ar condicionado observa-se que pelo menos 10% da amostra tem mais de 20 anos de uso. Próximo do final de sua vida útil e certamente com baixo desempenho e dificuldades de manutenção. Uma parte deles pode ser substituída por centrais de cogeração.
- d) Infelizmente uma boa parte dos questionários está com as respostas incompletas. Todo o conjunto de hospitais não pode ser avaliado por essa razão. E esse setor é muito adequado para a instalação de centrais de cogeração, pois se consome energia elétrica, energia térmica para aquecimento e para resfriamento ao mesmo tempo e em quantidades razoáveis.
- e) Mesmo assim, esse levantamento foi de muita utilidade possibilitando uma visão bem ampla de como se utiliza o ar condicionado nos setores pesquisados. Recomenda-se que esses questionários sejam revistos e atualizados.
- f) Sugere-se que o levantamento que foi efetuado seja terminado, completando-se os dados faltantes e melhorando a amostra, principalmente para os setores de hospitais e centros comerciais. Eles são grandes consumidores de energia elétrica e térmica e por isso clientes de grande potencial para o emprego dos sistemas de cogeração que são propostos no presente trabalho.



### **Localização das cargas de resfriamento**

- a) Observa-se que a localização dessas cargas pelo processo que foi usado nesse durante esse trabalho é uma tarefa cansativa e demorada, mas de baixo custo. O ideal seria que essa localização fosse feita por meio de cruzamento de banco de dados. Seria muito mais rápido e com certeza os resultados mais precisos.
- b) A área de interesse em que o trabalho de localização se desenvolveu apresenta um consumo mensal de energia elétrica estimado em torno de 176 GWh/mês. Isso equivalente cerca de 1/3 da geração de uma turbina da hidrelétrica de Itaipu, um valor considerável de energia.
- c) A medida que o tamanho da janela móvel aumenta a quantidade que é localizada para as centrais de cogeração vai diminuindo e, conseqüentemente, o consumo de energia que fica sob a responsabilidade de cada uma delas vai crescendo. Isso já era esperado, pois a área da janela também aumenta. No entanto, não podemos aumentar a área da janela indefinidamente pois existem limitações técnicas que dificultam a distribuição da água gelada para as maiores distâncias.
- d) Essa proposta é uma alternativa bastante viável, principalmente quando se trata de locais que já possuam motores para geração de emergência. O sistema pode ficar operando ao contrário, o backup de energia será dado pela concessionária.
- e) Em algumas plantas é comum ouvir os comentários que os sistemas de cogeração que são empregados apresentam mais confiabilidade que a própria rede da concessionária.
- f) Existe a possibilidade, em alguns casos, de em vez de se transportar água gelada, que apresenta maiores dificuldades devido as maiores vazões, pode ser usada a opção de se transportar vapor e produzir a água gelada em um local mais afastado.



## **Capítulo VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **Referências bibliográficas**

CARRIER, United Technologies, *Carrier History*, 2013. Disponível em:

<<http://www.carrier.com/carrier/en/br/about/history/>> Acesso em 20/10/2013

CATERPILLAR, *Foruns Cat - The Impact of Generator Set Underloading*, 16/02/2015, Disponível em: <<http://forums.cat.com/t5/BLOG-Power-Perspectives/The-Impact-of-Generator-Set-Underloading/ba-p/69719>> Acesso em 30/2/2015.

COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia, *Parecer Técnico sobre a Emissão de Gases Estufa – Projeto Rochaverá*, 2011.

COGEN EUROPE, *European Cogeneration Review - 2013*. Disponível em:

<[http://www.cogeneurope.eu/european-cogeneration-review\\_429.html](http://www.cogeneurope.eu/european-cogeneration-review_429.html)> Acesso em 10/4/2015.

COGENPORTUGAL – Notícias em Destaque. Disponível em:

<[http://www.cogenportugal.com/ficheirosUpload/DE\\_13\\_02\\_2015\\_a.pdf](http://www.cogenportugal.com/ficheirosUpload/DE_13_02_2015_a.pdf)> Acesso 10/01/2015.

COGENPORTUGAL – Notícias em Destaque. Disponível em:

<[http://www.cogenportugal.com/ficheirosUpload/DE\\_13\\_02\\_2015\\_b.pdf](http://www.cogenportugal.com/ficheirosUpload/DE_13_02_2015_b.pdf)> Acesso 10/01/2015.

CULLEN, William, *Of the Cold Produced by Evaporating Fluids and of Some Other Means of Producing Cold*, in *Essays and Observations Physical and Literary Read Before a Society in Edinburgh and Published by Them*, II, Edinburgh, 1756.

CUMMINS, Aplicação, *As melhores soluções para todas as suas necessidades de energia*, 2010. Disponível em: <<http://cumminspower.com.br/cases/imagens/arquivos/24-world-trade-center.pdf>> Acesso em 15/09/2014.

DA COSTA, Ênnio Cruz, *Refrigeração*, Editora Edgard Blucher, 1982.

DBDH - Danish Board Of District Heating, *District heating in Denmark*, 2014. Disponível em:

< <http://dbdh.dk/dhc-in-denmark/>> Acesso em 14/02/2015

ENGLEMAN, Ronald. R., *Commercial Building Applications for Fuel Cell Gas Turbine Hybrids: Analysis of Absorption Cooling Potential Using Exhaust Heat*, 2005.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Energia – PDE 2022. Disponível em:



<<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202022.pdf>>

Acesso em 10/04/2015.

EREC – European Renewable Energy Council, *European Heating and Cooling Market Study*, 2006. Disponível em:

<<http://www.erec.org/projects/finalised-projects/ecoheatcool.html>> Acesso em 10/03/2015

EUROHEAT, Euroheat & Power, *The Vision for District Heating & Cooling*, 2012. Disponível em: <[http://www.dhcplus.eu/wp-content/uploads/2012/05/120529\\_Vision\\_DHC\\_final.pdf](http://www.dhcplus.eu/wp-content/uploads/2012/05/120529_Vision_DHC_final.pdf)>

Acesso em 12/01/2015.

EVER-GREEN ENERGY, *District Cooling*. Disponível em:

<<http://www.ever-greenenergy.com/technologies/district-cooling/>> Acesso em 20/04/2015.

FINNISH, Finnish Energy Industries, *District Cooling Statistics*, 2014. Disponível em:

<<http://energia.fi/en/statistics-and-publications/district-heating-statistics/district-cooling>>

Acesso em 12/01/2015.

GDF Suez, *Brochura Climaespaço*. Disponível em:

<[http://www.climaespaco.pt/duplo\\_rede.htm](http://www.climaespaco.pt/duplo_rede.htm)> Acesso 10/01/2015.

GLADSTONE, John, *John Gorrie, the Visionary*, ASHRAE Journal, December 1998.

IEA - International Energy Agency, *Plastic Pipe Systems for DH, Handbook for Safe and Economic Application*, 1999. Disponível em:

<[http://www.iea-dhc.org/documents/Annex\\_V/8DHCT99-06LR.pdf](http://www.iea-dhc.org/documents/Annex_V/8DHCT99-06LR.pdf) />

Acesso em 23/03/2015.

IEA - International Energy Agency, *A Implementing Agreement on District Heating and Cooling, including the integration of CHP*, 2008. Disponível em:

<[www.iea-dhc.org/documents/Annex\\_VIII/Final\\_Report](http://www.iea-dhc.org/documents/Annex_VIII/Final_Report) /> Acesso em 23/03/2015.

IEA - International Energy Agency, *Policies and Barriers for District Heating and Cooling outside European Countries*, 2011. Disponível em:

<[www.iea.org/publications/freepublications/](http://www.iea.org/publications/freepublications/)> Acesso em 22/03/2015.

IEA - International Energy Agency, *District Heating for Energy Efficient Building Areas*, 2015.

Disponível em: <[www.iea.org/publications/freepublications/](http://www.iea.org/publications/freepublications/)> Acesso em 23/03/2015.





LINDSAY, James E., *Daily Life in the Medieval Islamic World*, Greenwood Publishing Group, 2005.

MALCZEWSKI, Jacek, *GIS And Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, 1999.

MITISUBICHI, Heavy Industries Ltd. - *Introduction of Centrifugal Chillers*, 2010.

NEEDHAM, Joseph, *Science and Civilization: Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 2, Mechanical Engineering*, Taipei: Caves Books Ltd., 1986.

NOGUEIRA, Luiz A. Horta, *Cogeração Fundamentos e Aplicações*, Disseminação de Informações em Eficiência Energética – DIEE – Procel, Eletrobras, 2012.

QATAR COOL, Benefits Of District Cooling. Disponível em:

<<http://www.qatarcool.com/districtcooling.php?idsub=2>> Acesso em 18/04/2015

RAYMOND, Becker, *John Gorrie, M.D.: Father of Air Conditioning and Mechanical Refrigeration*, Carlton Press, 1972.

STELLAR ENERGY, Cutting-edge Cooling Solutions, 2015. Disponível em:

<<http://www.stellar-energy.net/products/district-cooling/our-solutions.aspx>>

Acesso em 18/04/2015

SDHA, Swedish District Heating Association, *District Heating in Sweden*, 2015. Disponível em: <<http://www.svenskfjarrvarme.se/In-English/District-Heating-in-Sweden/>>

Acesso em 12/01/2015

SYDNEY, City of, *Decentralised Energy Master Plan Renewable Energy 2012-2030*, Dezember 2013. Disponível em: <<http://www.cityofsydney.nsw.gov.au>> Acesso em 12/09/2014.

TABREED, *Our District Cooling Plants.*, 2015. Disponível em:

<<http://www.tabreed.ae/en/district-cooling/our-district-cooling-plants.aspx>>

Acesso em 20/04/2015.

THERMAX, Europe Ltd., *Multy-energy Vapour Absorption Machines*, 2008.

WAUKESHA, Dresser Rand, *Power Generation Case Study # 1421*, 2009.

## **Legislação do Setor Elétrico**



- LEI Nº 9.074, de 7 de julho de 1995
- DECRETO Nº 2.003, de 10 de setembro de 1996
- LEI Nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996
- RESOLUÇÃO ANEEL Nº 265, de 10 de junho de 2003
- DECRETO Nº 5.163, de 30 de julho de 2004
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 77, de 18 de agosto de 2004
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 167, de 10 de outubro de 2005
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 235, de 14 de novembro de 2006
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 247, de 21 de dezembro de 2006
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, de 9 de setembro de 2010
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, de 17 de abril de 2012
- LEI Nº 10.295, de 17 de outubro de 2001
- DECRETO Nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001

### **Legislação do Setor de Gás Natural**

- LEI Nº 11.909, de 4 de março de 2009
- DECRETO Nº 7.382, de 2 de dezembro de 2010
- PORTARIA MME Nº 472, de 05 de agosto de 2011
- RESOLUÇÃO ANP Nº 51, de 29 de setembro de 2011
- RESOLUÇÃO ANP Nº 52, de 29 de setembro de 2011
- DECRETO Nº 43.888, de 10 de março de 1999
- DECRETO Nº 43.889, de 10 de março de 1999
- PORTARIA CSPE Nº 26, de 21 de fevereiro de 2000
- PORTARIA CSPE Nº 139, de 30 de agosto de 2001
- PORTARIA CSPE Nº 160, de 20 de dezembro de 2001
- PORTARIA CSPE Nº 182, de 21 de junho de 2002
- PORTARIA CSPE Nº 232, de 14 de abril 2003



- PORTARIA CSPE Nº 439, de 28 de dezembro de 2006
- DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 230, de 26 de maio de 2011
- DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 231, de 26 de maio de 2011
- DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 379, de 28 de novembro de 2012

### **Legislação Municipal**

- LEI Nº 13.614, de 2 de julho de 2003
- DECRETO Nº 44.755, de 18 de maio de 2004
- PORTARIA 107/ P /88, de 04 de novembro de 1988
- LEI ORGÂNICA - promulgada em 04 de abril de 1990
- LEI Nº 13.430, de 13 de setembro de 2002 - Plano Diretor Estratégico
- LEI Nº 14.023, de 8 de julho de 2005 (vetada)
- PROJETO DE LEI Nº 392, de 2001
- DECRETO MUNICIPAL Nº 35.809, de 16 de janeiro de 1996
- DECRETO Nº 47.510, de 26 de julho de 2006
- DECRETO Nº 38.139, de 1 de julho de 1999
- LEI Nº 10.257, de 10 de julho de 2001
- LEI Nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979
- LEI Nº 10.932, de 03 de agosto de 2004
- RESOLUÇÃO CONJUNTA Nº 001, de 24 de novembro de 1999
- CÓDIGO CIVIL
- LEI Nº 13.688, de 19 de dezembro de 2003

### **Meio Ambiente**

- LEI Nº 14.933, de 5 de junho de 2009
- PROJETO DE LEI Nº 0252, de 2007
- DECRETO Nº 8.468, de 08 de setembro de 1976
- LEI Nº 13.798, de 9 de novembro de 2009



- LEI ESTADUAL Nº 9.509/97, de 20 de março de 1997

- LEI ESTADUAL Nº 997, de 31 de maio de 1976

- DECRETO Nº 52.209, de 24 de março de 2011

### **Sites de empresas**

|   |  |
|---|--|
| Carrier United Technologies             | <a href="http://www.carrier.com">www.carrier.com</a>   |
| Caterpillar Inc.                        | <a href="http://www.caterpillar.com">www.caterpillar.com</a>                                 |
| Cummins Power Generation Inc.           | <a href="http://www.cumminspower.com">www.cumminspower.com</a>                               |
| Daikin McQuay International             | <a href="http://www.daikinmcquay.com">www.daikinmcquay.com</a>                               |
| Hitachi Appliances, Inc.                | <a href="http://www.hitachi-ap.com">www.hitachi-ap.com</a>                                   |
| Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.       | <a href="http://www.mhi-global.com">www.mhi-global.com</a>                                   |
| Shuangliang Eco-energy Systems Co. Ltd. | <a href="http://www.shuangliang.com/eng/eindex.asp">www.shuangliang.com/eng/eindex.asp</a>   |
| Thermax Europe Ltd.                     | <a href="http://www.thermax-europe.com/default.aspx">www.thermax-europe.com/default.aspx</a> |
| Trane Ingersoll Rand, Inc.              | <a href="http://www.trane.com/index.aspx">www.trane.com/index.aspx</a>                       |
| Yazaki Energy Systems, Inc.             | <a href="http://www.yazakienergy.com">www.yazakienergy.com</a>                               |
| York - Johnson Controls, Inc.           | <a href="http://www.johnsoncontrols.com">www.johnsoncontrols.com</a>                         |
| Wärtisilä Corporation                   | <a href="http://www.wartisila.com">www.wartisila.com</a>                                     |
| Waukesha GE Company                     | <a href="http://www.ge-distributedpower.com">www.ge-distributedpower.com</a>                 |

## Capítulo VIII - ANEXOS

### Modelo do questionário aplicado

O questionário aplicado pela Comgás foi elaborado para usos em imóveis que tem instalado, preferencialmente, sistemas centralizados de ar condicionado. A sua aplicação foi feita por meio de entrevistas e visitas aos prédios, pois sem essas visitas, dificilmente todas as questões seriam respondidas de forma adequada, principalmente aquelas que envolviam maior conhecimento técnico do equipamento utilizado.

| Item                  | Questão   | Exemplo de resposta   |
|-----------------------|---|---|
| Dados de cadastro     | Número de ordem<br>Identificação<br>Tipo<br>Endereço<br>Região<br>Data da construção  | 1,2,3...<br>Nome do imóvel<br>Escritório, shopping, hospital  |
| Áreas ocupadas        | Área útil total (m <sup>2</sup> )<br>Área útil /andar I (m <sup>2</sup> )<br>Qtd. Andares<br>Qtd. salas / andar<br>Área / sala (m <sup>2</sup> )  |   |
| Informação de contato | Administradora<br>Status<br>Classe<br>Tipo Ocupação<br>Telefone Administradora<br>Zelador<br>Telefone zelador<br>Recepção<br>Telefone recepção<br>Contato (empresa)<br>Tipo contato<br>Contato (nome)<br>Telefone contato<br>Data Contato | Construído, em construção, planejado<br>A padrão elevado com heliporto, B comum<br>Individual, multi-ocupado, pelo proprietário |



| Item                            | Questão   | Exemplo   |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Dados do ar condicionado</b> | Tipo de Equipamento<br>Equipamentos existentes<br>Tipo de chiller<br>Quantidade de equipamentos<br>Fabricante<br>Capacidade unitária (TR)<br>Tempo de uso (anos)<br>Ano de fabricação do equipamento<br>Seg a sex: das h/ até h<br>Sábado: das h/ até h<br>Domingo: das h/ até h<br>Equipamentos de acumulação de gelo<br>Capacidade de acumulação (ton gelo)<br>Torre resfriamento - Vazão (m <sup>3</sup> /h)<br>Quantidade de equipamentos | Central, individual<br>Chiller água, chiller ar, janela, self-contained, split<br>Alternativo, rotativo, centrifugo, absorção |
| <b>Observações gerais</b>       | Existem problemas com energia elétrica?<br>Existem planos de expansão edificação?<br>Restrições no aumento do consumo?<br>Existe interesse de geração na ponta?<br>Conhece, há interesse em cogeração?<br>Interesse em substituir equipamentos?<br>Existe um cronograma/prazo?  |   |