UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE ACIONAMENTO DO SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDO INTERMEDIÁRIO EM SISTEMAS CENTRAIS DE CLIMATIZAÇÃO.

Vinicius Navarro Herdy

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE ACIONAMENTO DO SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDO INTERMEDIÁRIO EM SISTEMAS CENTRAIS DE CLIMATIZAÇÃO.

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de graduação em Engenharia.

Vinicius Navarro Herdy

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Herdy, Vinicius Navarro

Avaliação do controle de acionamento do sistema de circulação de fluido intermediário em sistemas centrais de climatização / V.N. Herdy. – São Paulo, 2011.

68 p.+ anexo

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Climatização 2. Simulação 3. Controle 4.Fluido intermediário I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

O trabalho aqui apresentado tem como principal objetivo identificar a configuração de controle de acionamento do sistema de circulação de água gelada que apresenta o menor consumo energético de sistemas de climatização de edifícios. A avaliação é realizada considerando um edifício comercial localizado na cidade de São Paulo. O edifício é desenhado em um aplicativo de modelagem 3D, e o consumo energético anual é avaliado no aplicativo EnergyPlus variando-se 3 parâmetros: intensidade de uso (ocupação e uso de equipamentos), nível de iluminação e regime de vazão do sistema de circulação de água gelada (fluido intermediário). A modelagem é realizada segundo as diretrizes apresentadas na norma ASHRAE 90.1. O sistema de referência no mercado brasileiro de sistemas centrais de climatização utiliza bomba de rotação constante no anel primário sem acionamento no secundário. Os resultados mostraram que o sistema com bomba variável no primário, sem secundário, apresenta menor consumo energético (-1,5% em relação à referência) e as outras opções (primário constante com secundário variável e vice-versa) apresentaram consumos superiores (+0,5% e +2,0%, respectivamente) para todas as condições estudadas. O mesmo edifício simulado no Rio de Janeiro e em Salvador apresentou alta no consumo de 23% e 34%, respectivamente, em comparação com São Paulo. Nessas cidades observou-se a mesma tendência de consumo para os diferentes regimes de vazão de água gelada, e a estratégia de menor consumo é ainda mais econômica comparativamente, apresentando baixa de 1,9% em relação à referência.

ABSTRACT

The paper here presented has as its main objective identifying the configuration of the control system of circulation of chilled water that has the lowest energy consumption of HVAC systems for buildings. The evaluation is performed considering a commercial building located in the city of São Paulo. The building is designed in a 3D modeling software, and the annual energy consumption is evaluated in the software EnergyPlus, by varying three parameters: intensity of use (occupancy and use of equipments), lighting levels and flow regime in the chilled water loop (intermediate fluid). The modeling is performed according to the guidelines of the standard ASHRAE 90.1. The reference system in the Brazilian market of central HVAC is a constant speed pump in the primary loop without secondary pump. The results showed that the system with variable pump in the primary, no secondary, has a lower energy consumption (-1.5% compared to the reference) and the other options (constant primary with variable secondary, and vice versa) had higher ones (+ 0.5% and +2.0%, respectively) for all conditions studied. The same building simulated in Rio de Janeiro and Salvador presented increases in consumption of 23% and 35%, respectively, compared with São Paulo. In these cities the same trend was observed for different flow regimes of chilled water, and the strategy of lower consumption is still more interesting comparatively, with reduction of 1.9% compared to the reference.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Definição do problema 3

1.2. Objetivos 4

1.3. Programas utilizados 4

1.4. Norma 90.1 da ASHRAE 5

1.4.1. Envoltória 6

1.4.2. Sistemas de climatização 7

1.4.3. Aquecimento de água 8

1.4.4. Sistemas elétricos 8

1.4.5. Iluminação 8

1.4.6. Outros equipamentos 8

1.5. Sistema de climatização 9

1.5.1. Funcionamento 9

1.6. Revisão bibliográfica 16

1.6.1. Resumo dos trabalhos de Taylor (2002) e Kirsner (1996) 16

1.6.2. Resumo do trabalho de Gao et al. (2011) 18

1.6.3. Resumo do trabalho de Ma&Wang (2008) 19

2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO 21

2.1. Materiais e elementos construtivos 22

2.2. Janelas 22

2.3. Perfis de utilização do edifício (iluminação, ocupação e equipamentos) e níveis de atividade 23

3. FATORES ENVOLVIDOS NO CONSUMO ENERGÉTICO 26

3.1. Fatores externos 26

3.1.1. Infiltração 26

3.1.2. Coeficientes de sombreamento e transferência de calor em janelas 27
3.1.3. Coeficiente de transferência de calor em paredes 28
3.1.4. Sombra e ganho solar 28
3.1.5. Radiação solar 29
3.1.6. Inércia térmica 29
3.1.7. Outros fatores externos 30
3.2. Fatores internos 31
3.3. Cálculo da carga térmica 32
4. METODOLOGIA DE MODELAGEM DO PROBLEMA 33
4.1. Modelagem do edifício no Google SketchUp 8 33
4.2. Modelagem do edifício para simulação no Energy Plus 37
4.2.2. Localização do edifício e clima 38
4.2.3. Materiais e elementos construtivos 39
4.2.4. Perfis de utilização e cargas internas 41
4.2.5. Sistema de refrigeração 43
5. TARIFAS DE ENERGIA 49
5.1. Modalidades tarifárias 51
5.1.1. Tarifação convencional 51
5.1.2. Tarifação horo-sazonal Verde 52
5.1.3. Tarifação horo-sazonal Azul 53
5.2. Energia elétrica reativa e fator de potência 54
6. SIMULAÇÕES 56
6.1. Resultados da simulação para o edifício de referência 58
6.2. Resultados das demais simulações 60
6.3. Resultados das simulações para outras cidades 62
ANEXO 69
LISTA DE REFERÊNCIAS 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Vantagens e desvantagens do circuito com primário variável. 16

Tabela 4.1. Propriedades das paredes fictícias. 36

Tabela 4.2. Características da cidade de São Paulo. 38

Tabela 4.3. Características climáticas da cidade de São Paulo 39

Tabela 4.4. Requisitos estabelecidos pela norma 90.1 (ASHRAE, 2007) para edifício de estrutura metálica localizado na zona climática 2. 40

Tabela 4.5. Propriedades dos elementos construtivos – zona climática 2. 40

Tabela 4.6. Carga térmica gerada por equipamentos de escritório e densidade de pessoas. 42

Tabela 5.1. Subgrupos do grupo A 50

Tabela 6.1. Resultados anuais do sistema de climatização de referência (primário constante, sem secundário) nas condições de referência. 58

Tabela 6.2. Opções de compra de equipamentos. 65

Tabela 6.3. Resultados da análise econômica. 65

Tabela A.1. Calor gerado por pessoas em diferentes atividades (ASHRAE 90.1). 69

Tabela A.2. Densidade de carga de escritórios (retirada da NBR 16401-1/2008). 69

Tabela A.3. Perfis de uso de um edifício de escritório (retirada da ASHRAE 90.1).....70

Tabela A.4. Simulações.....71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema simplificado do sistema de refrigeração do edifício. 9

Figura 1.2.a. Circuito somente com bombas no anel primário. 10

Figura 1.2.b. Circuito com bombas nos anéis primário e secundário (sistema mais comumente usado no mercado dos Estados Unidos). 11

Figura 2.1. Planta de um andar do edifício e representação do edifício. 21

Figura 2.2.a. Perfis de ocupação. 24

Figura 2.2.b. Perfis de iluminação. 24

Figura 2.2.c. Perfis do sistema de climatização (1=ligado, 0=desligado). 24

Figura 2.2.d. Perfis de uso de elevadores. 24

Figura 4.1. Definição das guias de distâncias no Google SketchUp 8 e primeira zona térmica. 34

Figura 4.2. Edição da primeira zona térmica. 34

Figura 4.3. Criação e extrusão do trapézio. 35

Figura 4.4. Modelagem de um andar típico. 35

Figura 4.5. Modelo tridimensional de um andar típico do edifício em estudo.. 36

Figura 4.6. Paredes internas ao andar. 36

Figura 4.7. Detalhamento dos circuitos do sistema de refrigeração. 44

Figura 4.8. Sistema de dutos de ventilação e caixas VAV. 46

Figura 6.1. Simulações. 56

Figura 6.2. Matriz de consumo desagregado de energia elétrica – São Paulo. 58

Figura 6.3. Distribuição do consumo de energia mensal. 59

Figura 6.4. Consumo de energia elétrica anual total para as condições de uso máxima, mínima e de referência. Intensidade máxima corresponde às condições máximas de ocupação, equipamentos e iluminação; intensidade mínima corresponde às condições mínimas, conforme descrito na Fig. (6.1). 60

Figura 6.5. Participação percentual de cada fonte consumidora de energia para cada estratégia no consumo de energia do sistema de climatização. 61

Figura 6.6. Consumo anual total de energia elétrica em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador. 62

Figura 6.7. Demanda anual de eletricidade (por fonte consumidora) – Rio de Janeiro e Salvador.....63

Figura 6.8. Contribuição de cada parcela no consumo do sistema de climatização do edifício para as três cidades (valores em kWh).....63

Figura 6.9. Comparativo de consumo de energia elétrica para diferentes configurações do sistema de circulação de água gelada, para as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.....64

Figura A.1. Intensidade de iluminação (referência = 12 W/m^2). 72

Figura A.2. Intensidade de equipamentos (referência = 16,2 W/m^2).....72

Figura A.3. Consumo de energia por ventiladores (referência = 127 MWh – anual).....73

Figura A.4. Consumo de energia por bombas (referência = 94 MWh – anual).....73

Figura A.5. Consumo de energia por resfriamento (referência = 1 GWh – anual).....74

Figura A.6. Calor rejeitado ao meio externo (referência = 24 MWh – anual).....74

Figura A.7. Gastos anuais com energia do edifício (tarifas horo-sazonais verde e azul).75

1. INTRODUÇÃO

Este relatório se estrutura primeiramente expondo as motivações, definição do problema e a fundamentação teórica envolvida. Em seguida é feita a descrição dos softwares utilizados, da diretiva ASHRAE 90.1, da modelagem do sistema, bem como das simulações implementadas. Finalmente, com os resultados obtidos e as análises comparativa e econômica são efetuadas, seguidas das conclusões finais.

O uso de recursos para obtenção de energia, matérias-primas e água é fundamental para a saúde, segurança, bem-estar e conforto das pessoas, porém a obtenção desses recursos traz sempre desvantagens para o meio ambiente (como emissões de poluentes, resíduos líquidos e sólidos, etc). Nesse contexto o tema dos edifícios sustentáveis tem crescido em importância, apesar da alta complexidade envolvida. Com essa nova filosofia de edificações, se deseja uma construção capaz de aproveitar melhor os recursos da natureza durante seu funcionamento sem abrir mão do conforto de seus usuários.

O crescente interesse vem sendo demonstrado por vários estudos governamentais lançados com o fim de definir estratégias nesse sentido. Para citar alguns, destacam-se: (1) USGBC ("United States Green Building Council") - LEED ("Leadership in Energy and Environmental Design"), desde 2000 ("consensus-driven", bottom-up approach); e (2) BRE ("British Research Establishment") - BREEAM ("British Research Establishment Environmental Assessment Method"), desde 1990 ("institutional", top-down approach).

Por exemplo, conforme citado por Sá (2005), o programa LEED define uma espécie de escala de "mérito ambiental" ("Certified", "Silver", "Gold", "Platinum"), que depende do desempenho da edificação em cinco áreas de impacto ("Sustainable Sites", "Water Efficiency", "Energy and Atmosphere", "Materials and Resources", "Indoor Environmental Quality").

Cada área de impacto relevante define pré-requisitos (indispensáveis à obtenção de qualquer grau de mérito) e requisitos (a conformidade com os requisitos permite a obtenção de pontos que são a base da classificação final). Embora os resultados ainda

sejam pouco expressivos, os entes públicos estão se mobilizando para construir um cenário de sustentabilidade no setor, tendo como pano de fundo a energia utilizada e os impactos ambientais associados.

A minimização das necessidades energéticas está associada a muitos fatores, tais como arquitetura (utilização de vidros, posicionamento de janelas, forma do edifício, distribuição interna dos espaços), construção (inércia térmica dos materiais, isolamento térmico), utilização de equipamentos de alta eficiência energética (lâmpadas, eletrodomésticos, computadores, ar condicionado), entre outros.

No mesmo âmbito está presente a adoção de fontes renováveis de energia para o suprimento de algumas necessidades básicas do funcionamento de um edifício, como por exemplo energia solar para obter eletricidade (através de painéis fotovoltaicos) ou para aquecimento de água dos sanitários.

O ponto fundamental da sustentabilidade nos edifícios é que não se devem adotar medidas isoladas, sem estudos preliminares sobre possíveis consequências, simplesmente para categorizá-lo como sustentável. Medidas desse tipo podem inclusive gerar aumento no consumo energético.

Portanto a estratégia deve ser traçada para cada caso específico, definindo as diversas possibilidades de intervenção tecnicamente viáveis, e avaliando-as em termos de consumo energético e custos. Resultados em termos de energia economizada ou quantidade de gás carbônico equivalente evitada por cada unidade monetária investida.

Em resumo, as estratégias devem permitir a identificação clara do nível de consumo de referência (anterior às alterações), e o retorno esperado dessas alternativas deve ser quantificado (em âmbito ambiental, energético e/ou econômico). Entre as medidas possíveis para avaliar e melhorar a eficiência energética de um edifício está a simulação térmica detalhada para selecionar os requisitos mais adequados, e é nessa linha que se desenvolve este trabalho.

O estudo se foca primeiramente na caracterização de um edifício na cidade de São Paulo, evidenciando sua capacidade instalada e consumo diário, tendo em conta variações ao longo do ano. Mais especificamente, por meio de um aplicativo de simulação energética (Energy Plus), a construção é modelada, incluindo detalhes do sistema de refrigeração. A analise desenvolvida se baseia em estratégias de controle desse sistema. O prédio então é simulado, gerando resultados de consumo de energia elétrica e gastos financeiros anuais.

Num segundo momento, a simulação é repetida, porém com alterações em dois fatores: (1) regime de circulação de água gelada no sistema de climatização e (2) intensidade de uso do edifício (i.e. quantidade de pessoas, níveis de iluminação e utilização de equipamentos). Em seguida o edifício, inicialmente considerado na cidade de São Paulo, é simulado para as cidades de Rio de Janeiro e Salvador, a fim de calcular o consumo de energia em função do clima.

Ao final, com os resultados das simulações, é possível comparar o consumo energético e os gastos financeiros durante o funcionamento do edifício com os resultados de referência, levando em conta também os investimentos necessários para a implantação das novas estratégias, de forma a realizar uma análise econômica.

1.1. Definição do problema

Com o auxílio de um software de modelagem 3D e um segundo de simulação energética de edificações, é modelado o andar de um edifício de escritórios padrão da cidade de São Paulo. A modelagem é realizada levando em conta arquitetura (formas, dimensões), orientação das faces, área envidraçada, propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção e vidros, perfis de uso (ocupação, luzes, equipamentos, elevadores e climatização para cada hora do dia) e sistema de refrigeração e aquecimento do edifício.

Uma vez modelado, o prédio é simulado tendo em vista a obtenção de resultados de base em termos de consumo de energia elétrica. Em seguida a simulação é repetida, porém com alterações em dois fatores: (1) regime de circulação de água gelada no sistema de

climatização e (2) intensidade de uso do edifício (i.e. quantidade de pessoas, níveis de iluminação e utilização de equipamentos).

Vale ressaltar que, no mercado brasileiro de sistemas de climatização, a configuração de referência de circulação de água gelada apresenta acionamento constante no anel primário, sem acionamento no anel secundário. Os resultados dessa configuração são considerados como base de comparação neste trabalho. Além disso, as demais condições de base consideradas são: taxa de calor liberado de 12 W/m^2 para iluminação, 16,2 W/m^2 para equipamentos, e uma taxa de ocupação de 9,3 m^2/pessoa.

1.2. Objetivos

As diferentes combinações mostrarão a influência de cada um dos fatores citados no item anterior no consumo energético da edificação, e o correspondente impacto nos gastos financeiros anuais. A determinação da melhor estratégia de circulação de água gelada é o principal objetivo deste trabalho.

A análise de custos de implantação e retorno econômico constituem objetivos secundários.. Ao final, o mesmo edifício (previamente concebido na cidade de São Paulo) é também simulado no Rio de Janeiro e em Salvador, novamente para fins comparativos.

1.3. Programas utilizados

O programa de simulação energética utilizado é o EnergyPlus. (disponível em www.energyplus.gov). Trata-se de uma ferramenta gratuita, cuja estrutura modular permite a rápida implementação e simulação de modelos complexos.

A inserção dos dados geométricos do edifício no EnergyPlus pode ser feito mais facilmente através do programa Google SketchUp 8 (também gratuito, disponível em sketchup.google.com), e de seu aplicativo Open Studio.

O uso de softwares de simulação computacional permite uma avaliação relativamente rápida e confiável de edifícios, bem como da influência de diversos fatores em seu

consumo energético, tais como arquitetura, orientação, área e propriedades térmicas do envidraçamento, materiais e espessura de paredes, etc.

O modelamento do problema nos softwares citados é realizado a partir de recomendações presentes na diretiva ASHRAE 90.1 para edifícios, exceto prédios residenciais de baixo crescimento.

1.4. Norma 90.1 da ASHRAE

A norma 90.1 (ASHRAE, 2007) foi criada com o propósito de fornecer os requisitos mínimos de projeto de edifícios energeticamente eficientes. Mais especificamente, nela são definidas condições mínimas a serem atendidas na construção de novos edifícios, novas partes de edifícios existentes ou novos sistemas e equipamentos. Além disso são estabelecidos critérios para determinação da conformidade com estes requisitos.

São excluídas das recomendações da diretiva 90.1 residências unifamiliares, residências multifamiliares com três ou menos pavimentos acima do solo, construções manufaturadas, construções que não façam uso de eletricidade ou de combustíveis fósseis e equipamentos e porções dos sistemas do edifício que utilizam energia para fins industriais, de manufatura ou de processos comerciais.

Em termos legais, a diretiva define que todos os prédios novos devem obedecer ao padrão apresentado, assim como qualquer adendo (isto é, construções adicionais fora da envoltória original) ou alteração em prédios existentes. Por alteração entende-se qualquer mudança dentro de porções da envoltória, tais como janelas, sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado, aquecimento de água, potência, iluminação e outros processos semelhantes. As condições desses quesitos dentro do prédio em questão definem a observância ou não às regras estabelecidas.

O padrão se baseia no programa de certificação LEED para estabelecer os padrões mínimos de desempenho energético. No Brasil ele tem ganho importância nos últimos anos, embora seu emprego se limite principalmente à intervenção em projetos já

realizados. O acompanhamento do projeto desde sua fase inicial certamente traria benefícios no que diz respeito ao desempenho energético.

1.4.1. Envoltória

A norma 90.1 trabalha com o conceito de envoltória do edifício, que é simplesmente a fronteira entre as áreas condicionadas (i.e. com sistema de aquecimento, ventilação ou ar condicionado) e o exterior, ou entre essas áreas e outras áreas não-condicionadas (ou parcialmente condicionadas) dentro do próprio edifício. Dessa maneira, as recomendações levam em conta a capacidade dos sistemas de climatização de cada envoltória, bem como os equipamentos e outros fatores que geram calor dentro do prédio.

Embora a envoltória não consuma energia diretamente, ela se relaciona ao ganho e perda de calor através de pisos, tetos e paredes, estando portanto intimamente ligada à solicitação do sistema de climatização, consumo de energia elétrica e relativos gastos financeiros. Além disso, está relacionada às condições dos ambientes internos do edifício, ao conforto térmico dos ocupantes e à necessidade por iluminação artificial.

Assim, na definição da envoltória, deve-se ter em mente fatores internos e externos que contribuem para o aumento da temperatura interna e a possibilidade de uso de luz natural. Entre os fatores externos podem ser citados, por exemplo, radiação solar, ganho e perda de calor através de superfícies e infiltração de ar. Já os fatores internos incluem calor gerado pela atividade de pessoas, equipamentos e iluminação.

Estratégias devem ser traçadas de forma a garantir um bom balanço entre os fatores, refletindo na redução de consumo devido aos sistemas de iluminação e climatização. Por exemplo, calor é conduzido para o interior da envoltória pelas paredes devido ao aquecimento das superfícies externas pelo sol ao longo de todo o dia. Isso causa aumento da temperatura interna ao longo da noite, quando o prédio está vazio e o sistema de refrigeração, desligado. Assim, pode-se recorrer à ventilação noturna ou tomada de ar externo para reduzir a necessidade por resfriamento na manhã seguinte.

Dessa forma, itens considerados durante a inspeção de edificações incluem isolamento das paredes, telhado e pavimento, bem como quantidade e características de portas, janelas e vidros; e sistemas e equipamentos mecânicos e elétricos para climatização. Em resumo, a norma prevê uma série de medidas com relação a telhado, paredes e pisos, bem como frestas de portas e janelas.

No que se refere às janelas, a área envidraçada não pode ser superior a 40% da área total das paredes, e a 5% da área total do telhado (no caso de telhados "*skylight*"). Os coeficientes globais de troca de calor, de ganho de calor pelo sol e de transmitância da luz visível devem respeitar limites estabelecidos pela norma.

A propósito, os limites variam de acordo com a zona climática da cidade em que o prédio se localiza. A norma cita algumas cidades brasileiras, e as insere em duas zonas climáticas: Belém, Fortaleza, Recife, Rio de Janeiro e Salvador são classificadas como pertencentes à zona climática 1; Brasília, Porto Alegre e São Paulo pertencem à zona climática 2.

1.4.2. Sistemas de climatização

Sistemas de climatização estão relacionados a uma grande porcentagem do consumo de energia elétrica de um edifício. Para aumentar a eficiência energética, não bastam equipamentos com boa eficiência individualmente, mas sim um bom desempenho conjuntural, levando em conta inclusive a distribuição de fluxos de ar.

Nesse âmbito, a norma impõe limites mínimos de eficiência, condições para todo e qualquer componente substituído ou instalado em algum ambiente antes não climatizado, e condições para substituição e instalação de dutos do sistema. Além disso é requerido um vasto monitoramento dos sistemas de climatização, pelo controle de fatores como temperatura de zona por meio de termostato, *overlap* entre as faixas de temperatura do termostato de resfriamento e aquecimento, desligamento automático, humidade, formação de gelo/neve, etc. Por fim, são definidos critérios para isolamento térmico e vedação de dutos, tubos e plenums.

É importante frizar que a norma 90.1 considera também as vazões de água gelada nos anéis do sistema de climatização. É tomado como padrão de referência um sistema com bombas de rotação variável no anel primário, sem bomba no anel secundário. Esse aspecto é extremamente importante para este estudo e será explorado em detalhes mais adiante.

1.4.3. Aquecimento de água

Para sistemas de aquecimento de água, a norma 90.1 enfatiza o isolamento térmico de tanques e da tubulação de água quente, bem como a eficiência de caldeiras de aquecimento de água para consumo, aquecedores de piscinas e tanques de armazenamento. Além disso, uma série de controles devem serem efetuados (temperatura, bomba de circulação, etc).

1.4.4. Sistemas elétricos

Quanto à potência elétrica, a norma 90.1 limita a queda de tensão máxima dos sistemas de distribuição no edifício.

1.4.5. Iluminação

No que diz respeito à iluminação, a norma 90.1 leva em conta toda energia utilizada interna e externamente ao edifício. Isso inclui luminárias, lâmpadas, transformadores, dispositivos de controle. A norma ainda menciona dispositivos para o controle da iluminação. Como indicação, a norma estabelece que um sistema de iluminação eficiente gera calor a uma taxa de 12 W/m^2, e este valor será considerado como referência neste estudo.

1.4.6. Outros equipamentos

Por fim, a norma 90.1 menciona os níveis mínimos de eficiência de motores elétricos devido à importância desses elementos tanto no consumo direto de energia, quanto na liberação de calor para o ambiente, aumentando a carga térmica.

1.5. Sistema de climatização

O sistema de refrigeração do edifício possui três circuitos térmicos, sendo um resfriador ("*chiller*[1]"), um sistema de rejeição de calor, e outro para climatização do ar propriamente dito.

1.5.1. Funcionamento

O principal componente do sistema de climatização é o resfriador, que consiste num ciclo termodinâmico básico de refrigeração, com um evaporador, um compressor, um condensador e um dispositivo de expansão. Os anéis primário e secundário são responsáveis pela circulação da água gelada (uma mistura de água e um sal, também chamada fluido intermediário), que possibilita a climatização do ar propriamente dito. A figura 1.1 mostra um esquema simplificado do sistema de refrigeração do edifício.

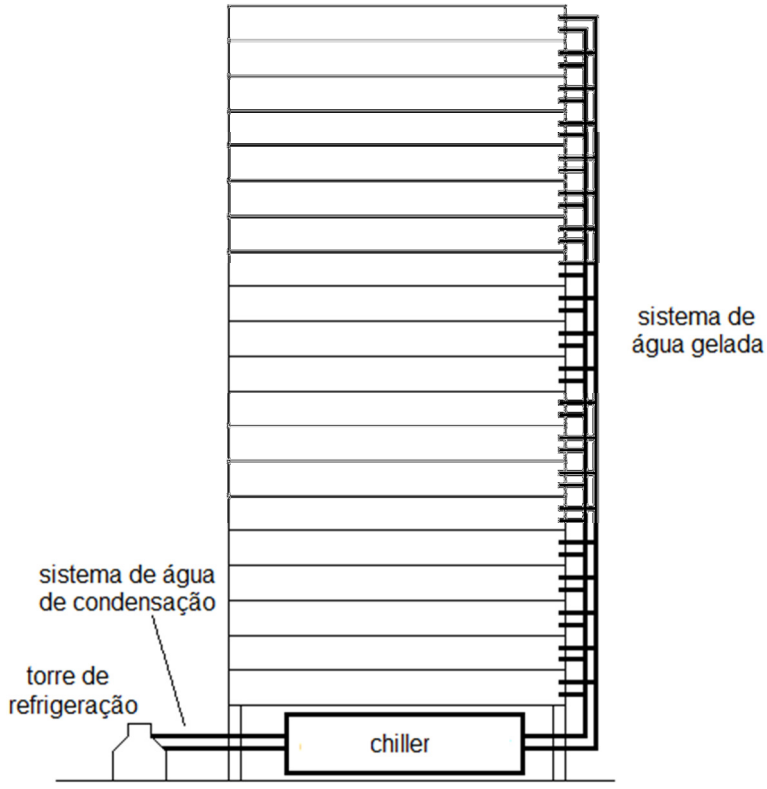

Figura 1.1. Esquema simplificado do sistema de refrigeração do edifício.

[1] Do inglês, resfriador

No anel secundário, o fluido intermediário que havia sido resfriado no *chiller* é recirculado pelos dispositivos de troca de calor espalhados por todo o edifício (denominados "*fan-coils*"[2]), a fim de condicionar cada ambiente. Naturalmente esse fluido retorna até o *chiller* a uma temperatura mais elevada, para ser novamente resfriado, repetindo o ciclo.

Existe ainda um outro ciclo responsável por rejeitar o calor do resfriador. Esse circuito é chamado de sistema de água de condensação. A água é resfriada em uma torre de resfriamento, onde rejeita o calor para o meio externo. Ela, então retorna mais fria até o *chiller*, onde voltará a ganhar calor, repetindo o ciclo.

1.5.2. Detalhes do sistema de bombeamento de água gelada e possíveis configurações

Os sistemas de condicionamento de ar mais frequentemente usados hoje em dia são baseados no fluxo variável de água gelada, que retira calor do ar nos *fan-coils*. As figuras 1.2-a e 1.2-b, retiradas de Taylor (2002), mostram esquemas dos dois circuitos.

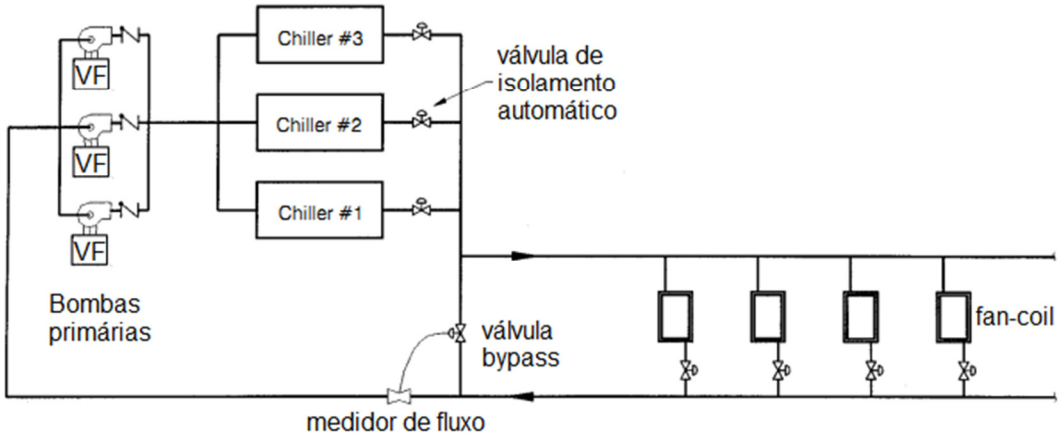

Figura 1.2.a. Circuito somente com bombas no anel primário.

[2] Do inglês, " ventilador-serpentina".

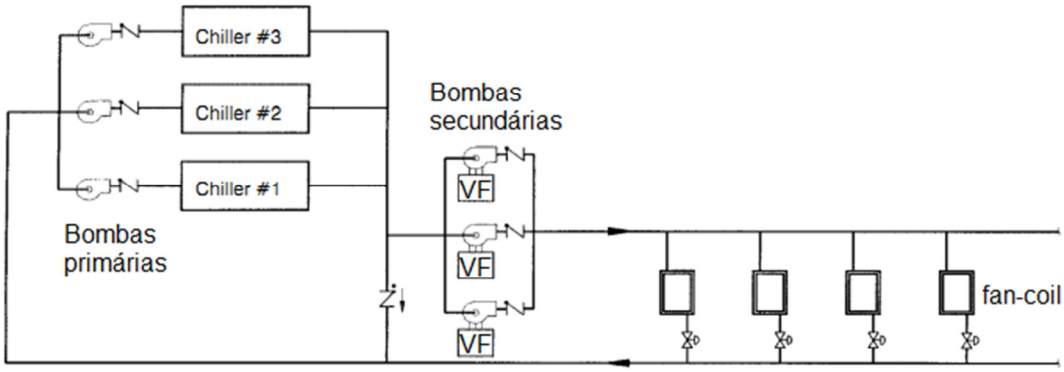

Figura 1.2.b. Circuito com bombas nos anéis primário e secundário (sistema mais comumente usado no mercado dos Estados Unidos).

No sistema de bombeamento de água gelada, pode-se ter diversas configurações no que diz respeito ao controle de vazão nos anéis primários e secundários. As Fig. (1.2.a) e (1.2.b) mostram elementos que representam bombas nos circuitos primário e secundário. Nas diversas configurações possíveis do sistema, essas bombas podem estar presentes (ou não) em ambos os circuitos, e podem apresentar rotação constante ou variável, de acordo com a presença de dispositivos variadores de frequência ("VF" nas figuras).

Neste trabalho diferentes regimes de vazão são adotados, e serão discutidos mais adiante. Entretanto as configurações mais usuais estão mostradas na Fig. (1.2), sendo que a Fig. (1.2.b) mostra sistema convencional utilizado nos Estados Unidos, com acionamento em ambos os anéis (bombas com rotação constante no anel primário e variável no anel secundário).

Também são mostradas na figura as válvulas do sistema, sendo uma de isolamento (para impedir refluxo), uma de *bypass* (para controlar a vazão no anel primário) e outras nos *coils* (para possibilitar o controle da vazão de água gelada de acordo com a demanda por climatização em cada andar). Vale lembrar que as figuras mostram sistemas genéricos, com três *chillers* cada. Entretanto o sistema de refrigeração do edifício estudado é mais simples, tendo apenas um *chiller* implantado.

Em geral a adoção de variadores de frequência é interessante em termos de custo na maior parte dos casos em que se usa vazão variável de água gelada. Os VF são controlados de forma a manter a diferença de pressão em um ponto do sistema abaixo de um certo limite estabelecido para produzir um fluxo mínimo nos *fan-coils*.

No que se refere ao sistema somente com bombas no anel primário (Fig. 1.2.a), é importante notar que os *chillers* são seguidos de válvulas de isolamento, que evitam o refluxo de fluido quando o resfriador está desligado. Além disso, as bombas poderiam ser instaladas individualmente para cada *chiller*, mas nesse tipo de sistema é mais interessante mantê-las separadas.

Outro ponto importante é a válvula de bypass, que é conectada a um medidor de vazão a fim de manter um fluxo mínimo através dos *chillers*, pois nos casos em que a demanda por água gelada nos *coils* é pequena, a vazão no primário poderia cair a níveis abaixo do mínimo necessário para o funcionamento dos resfriadores. O medidor identifica essa queda de vazão e abre a válvula.

No sistema com bombas primárias e secundárias (Fig. 1.2.b), elas são instaladas individualmente para cada *chiller*, mas poderiam também ser montadas separadamente. Na configuração separada, como cada uma poderia alimentar qualquer *chiller*, em caso de falha, o *chiller* correspondente poderia ser suprido pelo fluxo de outra bomba qualquer.

Além disso essa disposição permite a presença de uma bomba reserva. Por outro lado o sistema de bombas dedicadas é mais simples de ser controlado, sendo acionadas somente quanto o *chiller* necessita. Isso pode inclusive reduzir consumo de energia elétrica nas bombas do anel primário.

Está presente ainda uma válvula de verificação no ramo comum aos anéis primário e secundário. Em circuitos com fluxo primário constante (i.e. sem VF), essa válvula garante que os *chillers* sejam utilizados próximos da capacidade máxima, reduzindo o

consumo global do sistema. Em sistemas com rotação variável nas bombas do anel primário, a presença da válvula tem efeito nulo.

Por fim, em geral nesse tipo de circuito as bombas do anel primário têm rotação constante. Variadores de frequência poderiam ser instalados nessas bombas a fim de variar o fluxo do anel primário com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica nesse circuito, mas em geral os custos de investimento e a complexidade não se justificam. Além disso o principal benefício de um sistema com bombas em ambos os anéis são simplicidade e segurança contra falhas, e a adição de VF poderia comprometer essas vantagens.

Existem algumas vantagens do circuito com acionamento variável no anel primário somente, em comparação com o sistema convencional. Primeiramente, os custos de investimentos são menores, visto que não há bombas no anel secundário e respectivos aparatos de instalação. Essa economia, no entanto, é parcialmente equilibrada pelos maiores custos dos VF do primário (pois as bombas são maiores e mais potentes, requerendo dispositivos mais sofisticados). A presença da válvula *bypass* também acarreta custos extras.

Outra vantagem interessante dessa tipologia é o menor espaço solicitado, devido ao menor número de bombas, o que também pode contribuir para redução de custos e complexidade. Além disso, a potência do motor dedicado à rotação da bomba é reduzida devido à ausência de elementos dissipadores de potência no circuito secundário, e porque na maior parte dos casos a eficiência das bombas no anel primário é maior (em virtude do maior fluxo associado).

Por fim, o consumo de energia elétrica das bombas é mais baixo nessa configuração. Em circuitos com acionamento constante no anel primário, e variável no anel secundário, a bomba do primário está constantemente em funcionamento, o que pode significar desperdício de energia para situações de baixa demanda nos andares.

A utilização de variadores de frequência no anel secundário sem dúvida implica num melhor controle de retirada de calor dos ambientes. Por outro lado, a perda de carga no anel secundário é consideravelmente maior do que no primário, o que acarreta um consumo maior de energia. Dessa forma, a instalação de variadores de frequência nos dois circuitos poderia trazer bons resultados.

Um outro fator interessante é verificado nesse circuito devido à ausência dos variadores de frequência no anel secundário. A presença desses dispositivos introduz ao sistema elétrico do edifício uma característica de alta potência reativa, reduzindo o fator de potência total das instalações. Fator de potência abaixo de um certo valor pode acarretar multas para o edifício por parte da concessionária de energia elétrica, pois isso se relaciona à perda de eficiência do sistema global de distribuição de eletricidade.

É importante notar também, que em termos de investimento inicial, os dispositivos associados ao circuito secundário (válvulas, bombas e, principalmente, os variadores de frequência) são consideravelmente mais caros, o que é uma desvantagem. A propósito, também o circuito somente com bombas no anel primário apresenta desvantagens, como complexidade, possibilidade de falhas de controle de *bypass* e de controle no escalonamento dos *chillers*.

A válvula de *bypass* é necessária para garantir a mínima vazão nos *chillers*. A válvula deve ser automaticamente controlada pelo fluxo, de forma que as válvulas utilizadas em sistemas com bombas de rotação constante não funcionariam mais com bombas de velocidade variável porque elas são dimensionadas para funcionar a uma certa vazão, e portanto nunca abririam em condição de carga parcial do sistema. Assim, a nova válvula requer controle mais complexo, estando sujeita a falhas.

Essa válvula requer a instalação de medidores de vazão bem calibrados e muito precisos no circuito primário. Ela também deve ser capaz de garantir a vazão mínima dos *chillers*, ser robusta para suportar as repentinas variações de fluxo e pressão no circuito, e naturalmente ser à prova de falhas (tanto a válvula como seu complexo sistema de controle).

Nos casos em que existem mais *chillers* no sistema, quando um deles está operando e abruptamente outro entra em operação (em virtude do aumento da demanda de climatização do edifício), a vazão no primeiro cai também repentinamente, visto que a vazão total continua constante, sendo apenas dividida com o novo *chiller*.

Essas quedas repentinas de vazão causam problemas no escalonamento dos *chillers* (ou seja, no momento em que um deles é ativado ou desativado). A bomba de um *chiller* é acoplada a um grande motor elétrico, que sofre com alterações bruscas de regime. Ocorre que os componentes mecânicos do anel primário ficam sujeitos ao desgaste prematuro, comprometendo eficiência e confiabilidade do sistema, além de reduzir sua vida útil.

Em vista de toda a discussão anterior, aparentemente a utilização de circuitos acionados somente no anel primário com bombas de rotação variável é vantajosa, pois custa menos, consome menos energia e é virtualmente livre de falhas, apesar de ser mais complexo e requerer engenharia mais sofisticada.

Alguns autores como Kisner (1996) e Taylor (2002) mostram que sistemas de climatização com bombas variáveis somente no anel primário (e portanto sem sistema de bombeamento no secundário) apresentam consumo energético menor que o sistema convencional utilizado nos Estados Unidos, com acionamento em ambos os anéis (primário constante e secundário variável).

Este trabalho avalia, para o edifício em questão, as quatro configurações para o sistema de acionamento do circuito de água gelada: (1) acionamento variável no anel primário, e constante no secundário; (2) acionamento constante no primário, sem secundário (esta configuração corresponde à referência mais utilizada no mercado brasileiro), (3) acionamento constante no anel primário, variável no anel secundário e (4) acionamento variável no primário, sem secundário. O intuito é comparar o impacto de cada configuração no consumo de energia elétrica em um edifício comercial típico climatizado.

1.6. Revisão bibliográfica

Em vista da discussão anterior sobre sistemas de climatização, esta seção tem a finalidade de dar fundamentação teórica ao estudo. Para isso, algumas publicações que servirão de base para as análises e conclusões do trabalho são resumidas a seguir.

1.6.1. Resumo dos trabalhos de Taylor (2002) e Kirsner (1996)

Em seu artigo, Taylor (2002) traz uma excelente explicação sobre o funcionamento de sistemas centrais de climatização de edifícios, bem como evidencia vantagens e desvantagens das duas das principais configurações de sistemas de climatização: (1) sistemas de climatização com bombas variáveis somente no anel primário, sem acionamento no anel secundário, e (2) com acionamento constante no anel primário e variável no secundário (sistema convencional utilizado nos Estados Unidos).

Através de uma análise muito bem elaborada, são detalhadas as duas opções de sistemas, elencando aspectos positivos e negativos, porém sempre evidenciando as vantagens do sistema com acionamento no circuito primário (figura 1.2.a). A tabela 1.1 resume as principais vantagens e desvantagens desse sistema em comparação com o sistema convencional no mercado dos Estados Unidos (figura 1.2.b).

Tabela 1.1. Vantagens e desvantagens do circuito com primário variável.

Vantagens	Desvantagens
Menores custos iniciais	Complexidade de controle de *bypass*
Menor espaço necessário	Escalonamento de *chillers*
Menor potência de pico das bombas	
Menor consumo anual das bombas	
Reatividade do circuito elétrico	

Dessa forma, Taylor (2002) conclui seu artigo afirmando que esse tipo de circuito é mais apropriado para plantas com muitos *chillers* e relativamente alto consumo de base (ou

seja, o nível de consumo de energia mínimo diário), características esperadas em uma aplicação industrial. Nessas condições o uso da válvula *bypass* é mínimo (devido ao alto consumo de base) e as flutuações de vazão durante o escalonamento são menores (devido ao maior número de *chillers*).

Outro ponto levantado para a utilização desse sistema é a presença de engenheiros e futuros operadores no local de funcionamento, capazes de entender a complexidade dos controles e a necessidade de manutenção. A opção com acionamento nos anéis primário e secundário torna-se interessante em construções onde a segurança contra falhas é primordial (como por exemplo em hospitais, servidores de sistemas de segurança, minas subterrâneas, etc) ou onde a presença de pessoal qualificado para operação do sistema é inexistente.

Kirsner (1996) segue a mesma linha de Taylor, sendo inclusive mais radical no que se refere ao sistema convencional, antevendo o "falecimento do sistema de bombeamento primário-secundário em sistemas de água gelada". Na defesa do sistema com acionameno apenas no anel primário, Kirsner conclui seu artigo dizendo que os *chillers* modernos apresentam um controle muito bom e são capazes de lidar bem com fluxos variáveis. Além disso, segundo ele, fluxo constante no anel primário não seria capaz de suprir a quantidade necessária de água gelada nos *chillers* em certas condições.

Apesar da consistência analítica apresentada por Taylor (2002), e da argumentação radical (mas coerente) de Kirsner (1996), os resultados de ambos são basicamente qualitativos, não mostrando em que grau a melhor opção seria mais vantajosa que o sistema convencional. Além disso, o estudo de apenas duas configurações de sistema pode não trazer uma comparação suficientemente completa do tema. Em vista disso, o presente trabalho faz o estudo de caso de um edifício específico, trazendo a quantificação das eventuais vantagens verificadas. Em complemento, mais duas opções de sistema são analisadas, totalizando quatro configurações.

1.6.2. Resumo do trabalho de Gao et al. (2011)

Segundo Gao et al. (2011), sistemas de climatização com acionamento nos anéis primário e secundário nem sempre funcionam na melhor condição de eficiência devido à demanda excessiva de fluxo no anel secundário sob certas condições. Isso pode implicar em baixo fluxo através da válvula de *bypass*, e consequentemente em vazão abaixo do mínimo necessário para o correto funcionamento do sistema no anel primário.

Na realidade, o sistema tradicional não é tão eficiente quanto esperado à medida que a demanda por climatização nos andares do edifício aumenta (portanto exigindo aumento de vazão no anel secundário). Nessa condição, a vazão no anel secundário ultrapassa a vazão do anel primário, forçando a recirculação de água "aquecida" pelo circuito de água gelada. Essa água menos fria aumenta a demanda por refrigeração nos terminais de resfriamento, aumentando a vazão no anel. Assim é estabelecido um círculo vicioso.

Portanto, os principais problemas relacionados ao fenômeno são: alta temperatura da água gelada, elevada demanda por fluxo no secundário e, consequentemente, alto consumo de energia elétrica pelas bombas do anel secundário. Para eliminar o problema, é necessário que as vazões em ambos os anéis sejam iguais.

Em vista disso, Gao et al. (2011) estudam uma estratégia de controle a fim de desenvolver um sistema tolerante a falhas e com alta eficiência. A estratégia foca nas bombas do anel secundário para resolver o problema de fluxo deficitário, também agindo para a redução do consumo nas bombas desse anel. Ela se baseia na limitação de vazão no anel de forma que não exceda a vazão do anel primário, mas sem comprometer a capacidade de refrigeração do sistema. A estratégia também envolve a otimização do *set-point* de variação de pressão.

O desempenho da estratégia foi avaliado através da simulação de um sistema real, representando o sistema de água gelada e comparando-o com duas estratégias convencionais de controle. Os resultados mostraram que a estratégia proposta pode efetivamente eliminar o problema de baixo fluxo pela válvula de *bypass*, resultando em

reduções de consumo no circuito secundário de 70% no início do funcionamento e 50% em condições normais de operação.

O estudo destaca um problema grave verificado em sistemas de climatização convencionais, mostrando como um bom controle pode gerar apreciáveis reduções de consumo. Tendo em conta o estudo de Gao et al. (2011) em conjunto com os trabalhos de Taylor (2002) e Kirsner (1996), certamente uma estratégia conjunta de otimização poderia ser estudada, unindo a configuração mais eficiente de bombeamento com uma boa estratégia de controle.

1.6.3. Resumo do trabalho de Ma&Wang (2008)

Em seu trabalho, Ma&Wang (2008) apresentam estratégias de otimização de controle para bombas de rotação variável com diferentes configurações em sistemas complexos de condicionamento de ar para edifícios, para melhoria da eficiência energética.

Através de uma análise detalhada das características do sistema, são desenvolvidos modelos de queda de pressão para diferentes configurações da rede de dutos de água. Esses modelos são usados para determinar a melhor estratégia de controle sequencial das bombas. A estratégia de controle dessa sequência determina o número ótimo de bombas em operação tendo em conta suas demandas por potência e custos de manutenção.

Conforme explicado anteriormente, bombas de rotação variável em sistemas complexos de climatização podem ser classificadas em dois grupos: bombas que distribuem água gelada para os terminais de condicionamento de ar (nos *fan-coils*) e bombas movimentando fluido refrigerante pelos resfriadores (*chillers*). Em geral, as velocidades das bombas no anel secundário são controladas pela reinicialização do *set-point* de diferença de pressão através de sinais enviados pelas válvulas de fluxo nos *fan-coils*. Já as velocidades das bombas do primário são controladas por válvulas de controle de vazão.

O desempenho das estratégias foi avaliado através de simulações computacionais representando o sistema de ar condicionado, em comparação com outras estratégias de

referência. Os resultados mostraram reduções de 12% a 32% no consumo referente à estratégias de otimização de controle.

Mais uma vez, a implantação de técnicas apuradas de controle de fluxo nos circuitos de refrigeração mostra-se muito interessante no que se refere ao consumo de energia elétrica. Entretanto o trabalho mostra também que o sistema é bastante complexo, colocando em cheque sua viabilidade econômica. Talvez uma análise mais profunda acerca dos gastos relativos à implantação do controle fosse interessante para a avaliação se sua aplicabilidade.

É interessante notar que o controle de sistemas de climatização como os desenvolvidos por Gao et al. (2011) e Ma&Wang (2008) parecem muito promissores, mas estão fora do escopo deste trabalho. Portanto o estudo mais aprofundado, bem como avaliação de eventuais combinações de estratégias de redução de consumo ficam como sugestão para futuros trabalhos.

Em meio a tantas informações levantadas nos trabalhos comentados, uma pergunta persiste: será o circuito com bombas de rotação variável somente no anel primário realmente o mais adequado para o edifício em estudo? Os próximos passos consistem na avaliação do consumo energético do edifício para diferentes configurações dos regimes de vazão nos anéis primário e secundário. Essa avaliação é feita a partir dos resultados das simulações.

Vale lembrar ainda que a avaliação de qualquer estratégia para redução de consumo deve levar em conta o investimento necessário para aquisição e instalação de todo o sistema, para somente aí decidir qual é, de fato, a opção mais vantajosa em termos globais do projeto. Em outras palavras, deve-se ter em mente o retorno de investimento do sistema escolhido.

2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O estudo se desenvolve para um prédio de escritórios localizado na cidade de São Paulo. Trata-se de um edifício de 20 (vinte) pavimentos, com estrutura metálica, cuja planta de cada andar consiste num retângulo de 30 por 40 metros e um vão interno quadrado de 7 metros de lado (para escadas e elevadores) não climatizado; o pé direito é de 3 metros e existe um plenum de 0,6 metro de altura. A figura 2.1. mostra uma representação da planta de um andar (medidas em metros). Demais características do edifício seguem as recomendações da norma 90.1 (ASHRAE, 2007).

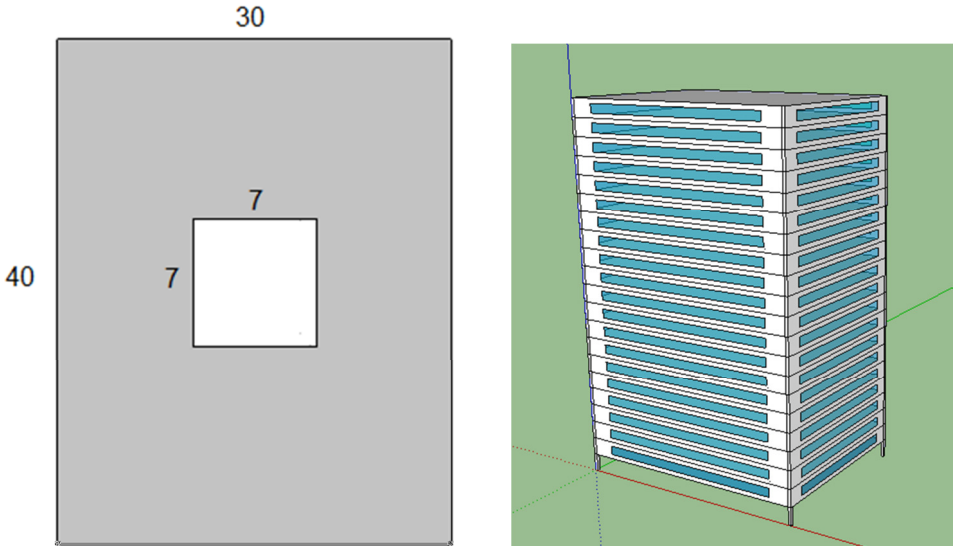

Figura 2.1. Planta de um andar do edifício e representação do edifício.

No que diz respeito aos materiais utilizados na construção do edifício, a norma 90.1 estabelece uma série de recomendações, conforme mencionado anteriormente (seção 1.4.1). O edifício estudado neste trabalho possui estrutura metálica, e portanto os valores de coeficientes de transferência de calor e insuflação são obtidos na norma para esse tipo de estrutura.

Outro fator importante a ser definido para caracterizar a edificação é o seu perfil de ocupação. A partir do número máximo de pessoas que o edifício comporta em um dia normal de funcionamento, define-se a porcentagem desse total efetivamente ocupando o

local ao longo das horas de um dia. A exemplo do perfil de ocupação, são definidos também perfis de iluminação e de utilização de equipamentos e elevadores dentro do edifício.

2.1. Materiais e elementos construtivos

A estrutura do edifício é predominantemente metálica, mas há também outros materiais correspondentes às camadas das paredes, tetos e pisos que devem ser inseridos no programa para simulação. Os materiais considerados são usuais no mercado de construção civil. As paredes são formadas por quatro camadas: gesso, lã de rocha, bloco de concreto e argamassa. No caso de pisos e tetos as camadas são três: contrapiso, isopor e concreto.

A espessura das camadas foi definida tendo em conta as propriedades e inércia térmica dos materiais utilizados, de forma a obedecer os limites definidos pela norma para isolamento (contra infiltração de ar) e coeficiente de transferência de calor de paredes, pisos e tetos. Os fatores considerados são para edifícios de estrutura metálica retirados da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007), inicialmente para condições climáticas da cidade de São Paulo, que para a norma utilizada se insere na zona climática 2.

2.2. Janelas

Conforme estabelecido pela norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007), a área envidraçada das paredes não pode ser superior a 40% da área total, de forma a garantir o compromisso entre iluminação natural e demanda energética para climatização. A partir das características do edifício, as áreas das paredes de cada andar são 120 m^2 e 90 m^2 (sendo 2 pares de paredes iguais).

Dessa forma, as janelas do modelo possuem áreas de 48 m^2 e 36 m^2. As mesmas são centralmente posicionadas nas paredes e foram concebidas de forma retangular de dimensões (32 x 1,5) m^2 e (24 x 1,5) m^2. As janelas constituem um fator fundamental no comportamento térmico do edifício, tanto pela possibilidade de perdas ou ganhos de calor por meio de frestas quanto pelo aumento do ganho interno devido à radiação solar.

De forma semelhante aos materiais de composição das paredes, tetos e pisos, as janelas também devem seguir as recomendações de transmitância térmica e ganho solar da norma 90.1, fatores que serão discutidos mais adiante.

2.3. Perfis de utilização do edifício (iluminação, ocupação e equipamentos) e níveis de atividade

Fatores imprescindíveis para a simulação do edifício são os perfis de ocupação, e de utilização de luzes e equipamentos (i.e. as variações dessas quantidades ao longo do dia). O trabalho considera que o perfil de equipamentos é igual àquele de ocupação (isto é, a intensidade de uso de equipamentos é proporcional à quantidade de pessoas presentes). Entretanto, existem infinitas maneiras como o prédio pode estar ocupado. Situação semelhante ocorre com o perfil de iluminação.

Naturalmente durante o período noturno (das 20:00 às 08:00) e aos fins de semana provavelmente o prédio está completamente desocupado (ou seja, com 0% da capacidade), com as luzes apagadas e equipamentos desligados em sua maioria. Porém a distribuição ao longo de um dia de trabalho é indefinida (horários de pico, percentual de pessoas que permanece durante o horário de almoço ou vai para casa um pouco mais tarde, etc).

Em vista disso, existem alguns padrões estabelecidos de maneira a auxiliar na escolha desses perfis. A norma NBR 16401 (ABNT, 2008) para dimensionamento de sistemas de ar condicionado e a norma 90.1 (ASHRAE, 2007) são exemplos disso. Para cada uma das 8760 horas de um ano, existem dados da variação horária de ocupação, iluminação, *setpoints* de termostatos e operação dos sistemas de climatização. Esses dados são disponibilizados para diversos tipos de edifícios, como hospitais, hotéis, escritórios, restaurantes, etc.

Os perfis utilizados neste trabalho seguem as orientações da ASHRAE 90.1 e são mostrados nas figuras 2.2.a a 2.2.d.

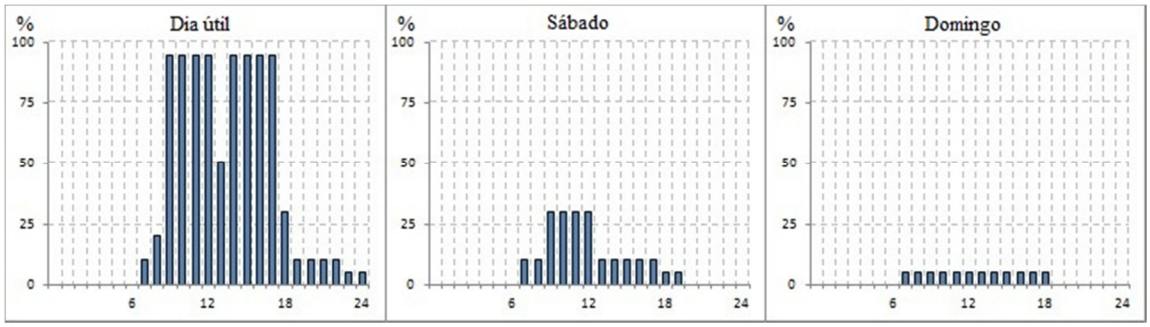

Figura 2.2.a. Perfis de ocupação.

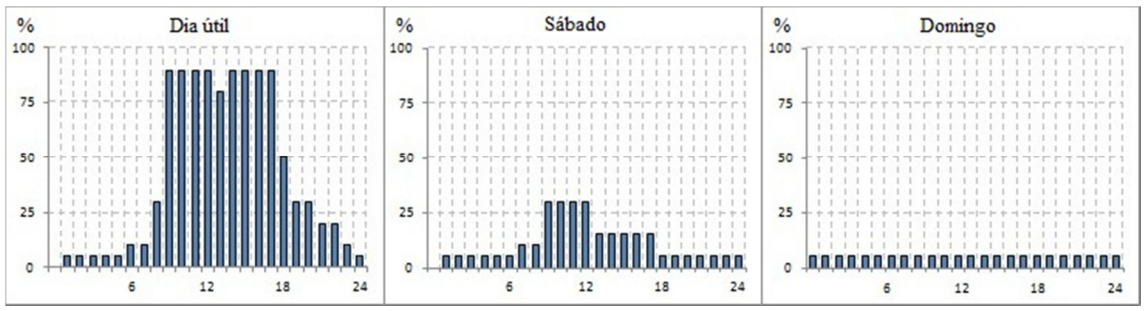

Figura 2.2.b. Perfis de iluminação.

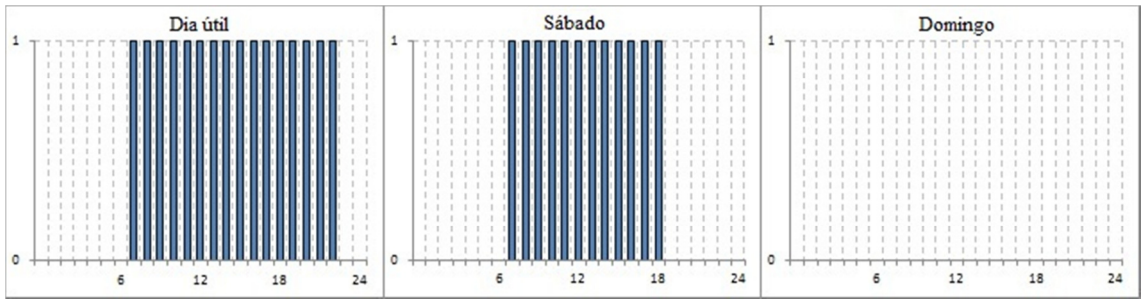

Figura 2.2.c. Perfis do sistema de climatização (1=ligado, 0=desligado).

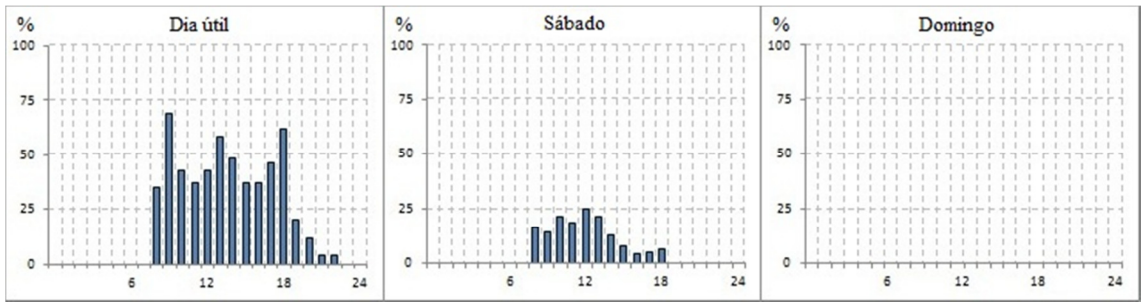

Figura 2.2.d. Perfis de uso de elevadores.

Como mostram as figuras anteriores, a norma 90.1 apresenta diferentes perfis (distribuição horária de ocupação, iluminação, utilização de elevadores, água quente e climatização) para os diferentes dias da semana (sábado, domingo e dias úteis). Esses perfis servem como guia para as ocasiões em que não se dispõe de dados mais precisos sobre o edifício em estudo.

No que se refere aos níveis de atividade, também foram seguidos os requisitos da norma 90.1 para iluminação (12 W/m^2) e da norma NBR 16401 para pessoas (115 W/pessoa, 9,3 m^2/pessoa) e equipamentos (16,2 W/m^2).

3. FATORES ENVOLVIDOS NO CONSUMO ENERGÉTICO

Denomina-se carga térmica a quantidade de calor a ser fornecido ou extraído de certa zona, por unidade de tempo, para manter o local em condições desejadas. São vários os fatores que afetam a intensidade da carga térmica das zonas estudadas em um dado modelo, sendo divididos em internos ou externos (Kaplan&Caner, 1992).

3.1. Fatores externos

Os principais fatores externos são: infiltração de ar, fatores de sombra e de ganho solar, coeficiente global de transferência de calor (transferência de calor por condução, convecção e radiação através de paredes, tetos, pisos e janelas), iluminação do sol e inércia térmica.

3.1.1. Infiltração

Conforme mencionado anteriormente, a infiltração de ar no edifício é um fator de grande importância para a norma 90.1. Infiltração pode ser um dos mais significativos transportadores de energia na simulação de um prédio. Provavelmente esse também é o parâmetro de simulação sobre o qual se tem menos informação. Dessa forma, em geral esse fenômeno é estimado dentro dos limites aceitáveis.

A norma 90.1 recomenda procedimentos para a entrada do modelo de infiltração, afirmando que "infiltração pode impactar apenas zonas do perímetro. Quando o sistema de climatização é ligado, assume-se que não ocorre infiltração. Quando o sistema é desligado, a taxa de infiltração para os edifícios com ou sem janelas operáveis deve ser assumido como sendo 0,038 CFM/ft^2 de parede exterior bruta."[3]

Embora existam poucos dados de suporte para essa afirmação, acredita-se que a orientação seja é um tanto simplista. A suposição de infiltração nula durante o horário de funcionamento do sistema de climatização se baseia no pressuposto de que a operação resultaria em pressurização do edifício.

[3] CFM corresponde a “cubic feet per minute”, ou seja, é uma unidade de vazão volumétrica

No entanto, isso exigiria um sistema de distribuição de ar bem concebido, bem equilibrado, e em bom funcionamento, além de negligenciar outros efeitos relacionados à infiltração, como efeitos de altura do edifício, alta frequência de entrada e saída dos ocupantes, portas permanentemente abertas, etc. Qualquer desses efeitos tem grande influência nos resultados de infiltração.

Da mesma forma, o valor obrigatório para infiltração fora o horário de operação do sistema de climatização é restritivo e simplista. Embora o valor possa ser geralmente apropriado, a norma não dá nenhuma orientação a respeito de quando esse valor se aplica. O valor de 0,038 CFM/ft^2 é uma suposição razoável de início, mas devem-se considerar as características do edifício que está sendo modelado para determinar a sua adequação final.

Enfim, a infiltração é uma questão extremamente importante para ser considerada durante a modelagem de um edifício, apesar da complexidade envolvida para sua estimativa devido ao grande número de variáveis influentes.

3.1.2. Coeficientes de sombreamento e transferência de calor em janelas

Valores comuns para o coeficiente de transmitância através de janelas ("*U-value*" no texto da norma 90.1) gira em torno de 6,25 W/(m$^{2\cdot}$K) para uma camada de vidro, e 2,78 W/(m$^{2\cdot}$K) para vidro duplo. No entanto, esses valores não consideram o efeito da moldura da janela. Uma moldura de alumínio sem isolamento pode aumentar esses valores para 6,98 e 4,42, respectivamente. Os valores variam de acordo com a zona climática onde a edificação se localiza.

Vidros apresentam valores de transmitância térmica bem mais altos que paredes e telhados, o que resulta em um grande efeito sobre o modelo de construção. A moldura opaca também pode ter um efeito significativo sobre o coeficiente global de sombreamento.

3.1.3. Coeficiente de transferência de calor em paredes

Em alguns casos o coeficiente de transferência de calor de uma parede pode ser menor que o isolamento devido a outras camadas, espaços com ar, etc. Em outros casos esse coeficiente pode ser bem maior que o isolamento. Em geral, espaçamento entre vigas e espessura afetam esse coeficiente.

Em certos casos o coeficiente de transmitância é difícil de ser calculado, sendo necessário avaliar sua importância no comportamento energético do prédio. Se a influência ocorre apenas em uma pequena região do edifício, então pode-se decidir por negligenciar o efeito. Em outras situações, quando ele é mais intenso, um maior refinamento do modelo é exigido, por exemplo através da adição de novas zonas térmicas.

3.1.4. Sombra e ganho solar

Quando um edifício apresenta grandes áreas envidraçadas, o ganho de calor devido ao sol pode ser o maior responsável pelo seu desempenho energético. Cálculos do ganho solar devem levar em conta latitude, período do ano, hora do dia, orientação da fachada do prédio (face norte, face sul), características físicas da superfície (material, composição, rugosidade, etc) e sombra.

Sombra exterior geralmente não é controlada pelos ocupantes e exerce um efeito sazonal no comportamento energético do prédio. Elementos geradores de sombra, como árvores e outras construções, podem bloquear o sol mais baixo do inverno mais do que o sol alto do verão. Árvores podem ainda perder suas folhas no inverno, gerando um efeito inverso. Enfim, ignorar esses efeitos de sombra podem gerar graves erros no cálculo da energia necessária para aquecimento ou resfriamento da construção.

Prédios localizados em áreas urbanas são bastante afetados pela sobra de outros prédios. Além disso, cada edifício pode gerar sombras sobre si mesmo, dependendo da disposição das paredes externas. Outro ponto importante, mas difícil de ser avaliado antes da construção efetiva do prédio, é o sombreamento interno controlado pelos

ocupantes. Nesse último caso são necessárias suposições com base na área envidraçada e orientação das paredes. Essas suposições também são feitas para os horários de utilização das venezianas. Todos esses fatores são fundamentais para a avaliação correta do desempenho energético de um edifício.

É importante enfatizar que sombreamento aumenta a demanda por aquecimento no inverno e diminui o consumo para resfriamento no verão. De modo semelhante, o ganho solar das primeiras horas do dia reduz a necessidade por aquecimento, enquanto à tarde aumenta o consumo de energia elétrica devido à climatização. Além disso, é notório que um coeficiente de sombra constante para todo o ano nao representa fielmente o manuseio de cortinas, árvores decíduas ou estruturas externas. Portanto esses aspectos são bem difíceis de modelar.

3.1.5. Radiação solar

A iluminação natural através de janelas como meio de reduzir o consumo de energia elétrica durante o dia tem sido cada vez mais comum. Nesse contexto, devem-se levar em conta tanto a redução de consumo de energia elétrica para iluminação quanto o aumento desse consumo devido ao uso mais intenso de ar condicionado.

Os dois fenômenos devem ser considerados durante a simulação, e os únicos meios possíveis de se fazer isso são reduzir o pico de iluminação requerida ou realizar a alteração completa no perfil de iluminação. Ambos os métodos não são fáceis de implementar, e podem levar a discrepâncias nos resultados (subestimações ou superestimações).

3.1.6. Inércia térmica

O cálculo do consumo de energia anual de um edifício depende muito da capacidade em estimar o ganho solar e a inércia térmica (chamada em inglês de "*thermal lag*"), fatores difíceis de se obter. O ganho ou perda de calor depende não apenas da diferença momentânea de temperaturas, mas também do seu histórico.

Em situações de regime transiente (temperaturas interna e/ou externa variando) calor é armazenado em paredes e telhado, gerando "*thermal lag*". Assim, a mudança de temperatura externa altera a temperatura interna dentro de um tempo diferente de acordo com a inércia térmica de paredes e telhado, pelos quais calor está passando.

Esse efeito afeta os períodos de solicitação por climatização bem como o armazenamento de energia dentro da envoltória. Dessa maneira a descrição de inércias térmicas pode ser importante para estimar as curvas de resfriamento e picos de demanda em prédios com elevada inércia.

Edifícios com maior inércia apresentam maior economia de energia devido ao frio noturno do que prédios mais "leves". O calor absorvido pelas paredes "pesadas" durante dias quentes é liberado para a atmosfera e para o interior do prédio à noite. O ar externo noturno é mais fresco e pode ser usado para resfriar o prédio, reduzindo o pico de energia demandado pelo sistema de climatização na manhã seguinte.

A quantidade de energia necessária para aquecimento ou resfriamento pela manhã é maior em prédios "pesados", a menos que isso ocorra quando o prédio já está ocupado. A taxa de transferência de calor diminui à medida que a diferença entre as temperaturas interna e externa diminui. Em um prédio "leve", a temperatura interna se aproxima da externa mais rapidamente que um prédio pesado semelhante.

A simulação apurada da inércia térmica do prédio melhora a precisão dos resultados de economia devido ao resfriamento noturno, assim como efeitos de ganho solar no uso do sistema de climatização.

3.1.7. Outros fatores externos

Existem outros fatores que podem ser influentes no consumo energético de um edifício, sob certas condições bastante específicas. Dentre eles, destacam-se espaços não-condicionados (onde transferências de calor podem ocorrer através de paredes, piso e teto), paredes interiores, espaços acima do telhado, perda de calor para o solo e clima.

3.2. Fatores internos

É necessário estimar o uso de equipamentos e iluminação tanto para verificar a quantidade de energia consumida por eles, quanto seus efeitos na demanda por climatização do prédio pelo usuário final. Em geral existem 3 tipos de parâmetros associados a esses usos: pico de potência consumida pelos equipamentos, perfil de potência consumida ao longo do dia e perfil de energia liberada por equipamentos para o ambiente em que eles se encontram.

A potência de pico raramente é atingida pela maior parte dos equipamentos, porém em geral ela é necessária para que se possa trabalhar com um perfil de utilização baseado em porcentagens desse número. Em geral a máxima potência utilizada não é a nominal dos equipamentos.

No que diz respeito à quantidade de potência consumida ao longo de um dia, é recomendado o uso da norma 90.1, conforme mencionado anteriormente (seção 2.3). Caso existam informações mais precisas a respeito do edifício em estudo, estas devem ser levadas em conta. Deve-se estar ciente de que, mesmo seguindo boas suposições a respeito dos perfis, os resultados das simulações podem ser distantes dos reais quando o edifício está apenas parcialmente ocupado.

O calor liberado para o ambiente interno pode ser proveniente tanto de fontes que consumam diretamente energia do edifício e liberem calor para o mesmo, quanto outras que somente liberem calor, sem consumir energia. São os casos de equipamentos e pessoas, respectivamente. Um equipamento confinado em um ambiente libera calor na mesma taxa em que consome energia para funcionar, pois energia é conservada e em último caso toda máquina dissipa energia mecânica na forma de calor.

Caso o equipamento tenha uma ventoínha, parte da energia é consumida diretamente por ele, de forma que o calor liberado para o ambiente é menor do que a energia consumida para seu funcionamento.

3.3. Cálculo da carga térmica

Em vista de tudo o que foi dito anteriormente, é importante definir uma série de valores de forma a quantificar os fatores mais relevantes dentre os citados. Esses valores podem ser obtidos a partir de dados disponibilizados no *ASHRAE Handbook of Fundamentals* (2001) ou na norma NBR 16401 (ABNT, 2008).

Nessas fontes podem ser encontrados valores de taxas típicas de calor liberado por pessoas exercendo diferentes atividades, vazão mínima de ar exterior para ventilação, taxas e fatores de carga térmica de iluminação, fatores de densidade de carga e carga térmica para equipamentos e ganho de calor e umidade para equipamentos (vide tabelas no anexo). Esses valores são fundamentais para implementar o modelo do edifício.

4. METODOLOGIA DE MODELAGEM DO PROBLEMA

O software de simulação de desempenho energético de um edifício deve incluir metodologias de cálculo para os componentes modelados, desde que preencha alguns requisitos. O software deve ser capaz de simular o modelo para as 8760 horas de um ano, tendo em conta variações de ocupação, iluminação, equipamentos, e sistemas de climatização para cada dia útil e fim de semana.

Além disso o software deve ser capaz de considerar todos os contribuintes para a carga térmica dos ambientes descritos anteriormente. O Energy Plus é um exemplo de software que atende aos requisitos, e por isso foi escolhido para realizar os estudos deste trabalho. O objetivo de qualquer simulação é transformar algo extremamente complexo (como um edifício) em um modelo simples, mas com a preocupação de obter resultados tão precisos quanto necessário. Um dos passos mais críticos é o zoneamento do prédio, e quanto menor o número de zonas, maior é a facilidade de lidar com o modelo.

A propósito, a construção de uma zona térmica no Energy Plus pode ser realizada a partir da inserção das coordenadas de cada vértice das superfícies da mesma. No entanto, mesmo para problemas simples esse procedimento pode se tornar complexo e susceptível a erros. Dessa forma, para o zoneamento de um andar do edifício em estudo, lança-se mão do software Google SketchUp 8, que possui um aplicativo (Open Studio) desenvolvido especialmente para criação de zonas térmicas a serem utilizadas no EnergyPlus.

4.1. Modelagem do edifício no Google SketchUp 8

O Google SketchUp 8 é um software livre desenvolvido para a concepção de maquetes virtuais. O aplicativo Open Studio permite a criação de arquivos que podem ser importados pelo EnergyPlus (extensão .idf), fornecendo todas as informações referentes à geometria das superfícies de paredes, pisos e tetos. A concepção das geometrias é simples, intuitiva e visual, o que facilita muito o trabalho do programador, além de minimizar o índice de erros.

A partir das informações elencadas nos capítulos 2 e 3, foi modelado um andar do edifício no SketchUp. É importante citar que o software é capaz de gerar zonas térmicas a partir de geometrias fechadas, fato que inicialmente não se verifica na planta do andar em questão (devido ao vão interno). Assim, o mesmo foi dividido em quatro zonas térmicas de seção trapezoidal e uma de zeção quadrada (a zona central), conforme explicado a seguir.

1) Primeiramente ativa-se o aplicativo Open Studio dentro do Google SketchUp 8 para que o arquivo seja gerado no formato correto para posterior exportação ao EnergyPlus. Então definem-se as guias de distâncias básicas, conforme a planta do andar (Fig. 4.1).
2) Em seguida cria-se a primeira zona térmica (caixa azul na Fig. 4.1) de forma que o programa interprete os elementos construídos nessa zona de maneira correta no momento da exportação do arquivo.

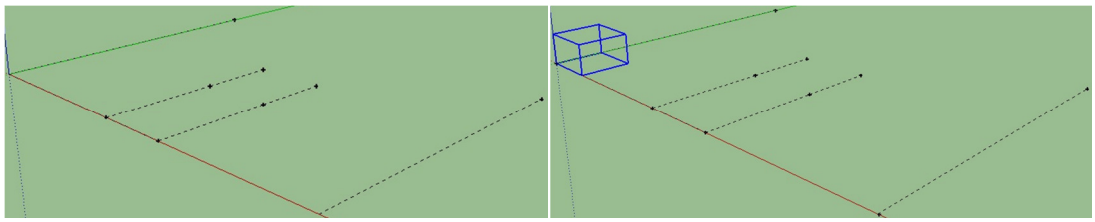

Figura 4.1. Definição das guias de distâncias no Google SketchUp 8 e primeira zona térmica.

3) Com dois clicks sobre a caixa azul, a zona térmica torna-se editável (caixa preta quadriculada na Fig. 4.2), e deste momento em diante se constróem as superfícies propriamente ditas.

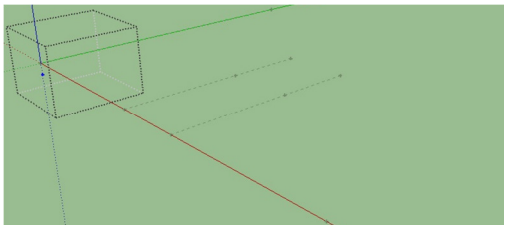

Figura 4.2. Edição da primeira zona térmica.

4) Então dentro dessa primeira zona térmica cria-se o primeiro trapézio (referido anteriormente) e dele, por extrusão, nascem as primeiras superfícies do andar (figura 4.3).

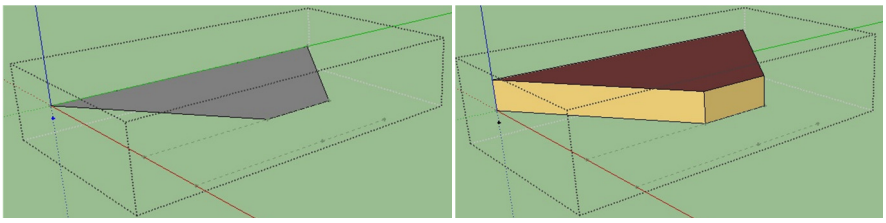

Figura 4.3. Criação e extrusão do trapézio.

Repetindo-se os passos 2, 3 e 4 para os outros três trapézios e para o vão central, obtém-se o andar completo (Fig. 4.4).

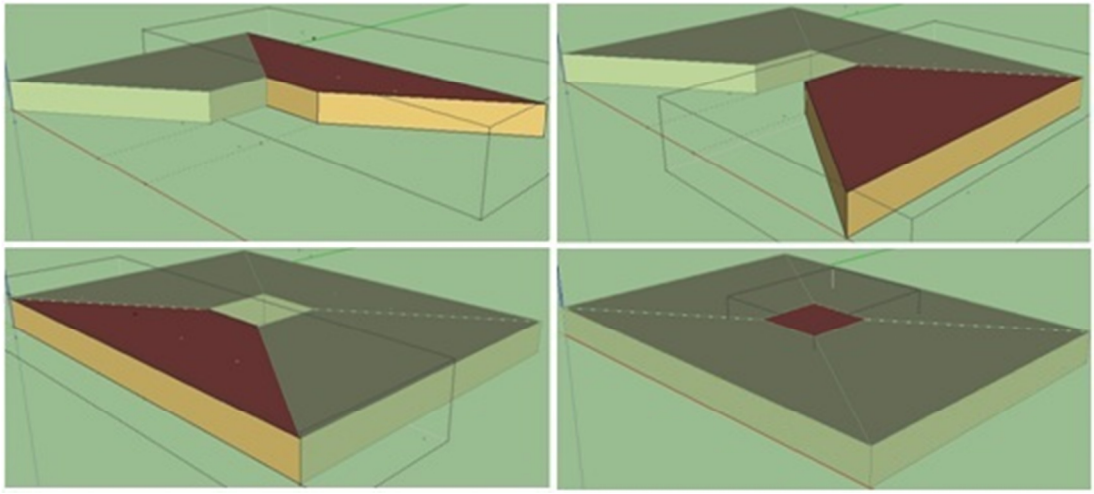

Figura 4.4. Modelagem de um andar típico.

Então são inseridas as janelas em cada uma das faces. O Open Studio interpreta automaticamente a construção de retângulos nas faces como janelas. A Fig. (4.5) mostra o modelo tridimensional de um andar típico com as janelas.

Por último é inserido um elemento denominado plenum, que corresponde ao vão entre o forro do teto (aquilo que de fato se vê ao olhar para cima dentro de um escritório) e a estrutura do piso do andar acima. O plenum foi definido com altura de 0,60 m.

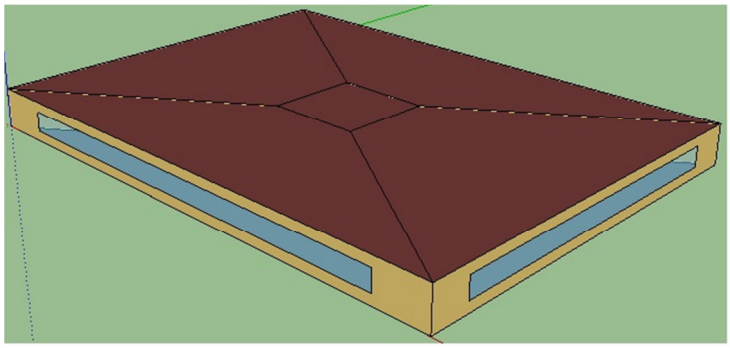

Figura 4.5. Modelo tridimensional de um andar típico do edifício em estudo..

É interessante notar que o andar concebido dessa maneira gera paredes internas que na realidade não deveriam existir. Na verdade essas paredes surgem como resultado secundário do artifício adotado para gerar as zonas fechadas, como explicado anteriormente. Essas paredes ficam aparentes quando se retira o teto do andar, como mostra a Fig. (4.6).

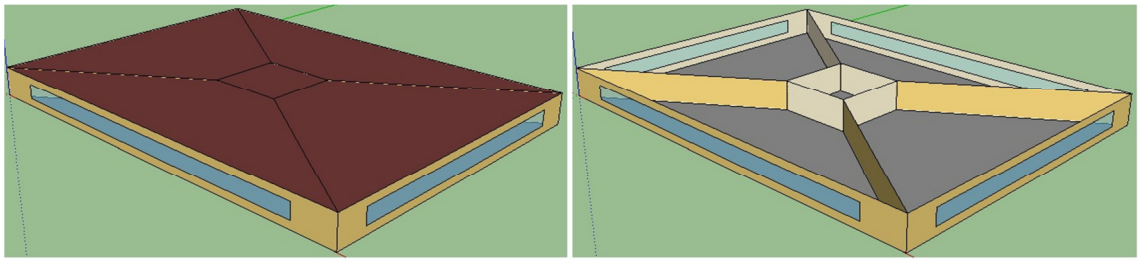

Figura 4.6. Paredes internas ao andar.

Esse impecílio é superado atribuindo às paredes fictícias propriedades físicas que resultem em resistência e inércia térmica muito baixas, conforme mostra a Tab. (4.1).

Tabela 4.1. Propriedades das paredes fictícias.

propriedade	símbolo	valor	unidade
condutividade térmica	k	100	W/(m K)
densidade	ρ	1	kg/m^3
calor específico	c_p	1	J/(kg K)
espessura	e	0,001	m

4.2. Modelagem do edifício para simulação no Energy Plus

O EnergyPlus é um software livre desenvolvido para auxiliar no dimensionamento de sistemas de climatização e analisar o desempenho energético de edifícios. A partir da inserção de dados característicos da edificação, o programa calcula a carga térmica solicitada para manter os limites estabelecidos de temperatura, o consumo de energia pelos sistemas de condicionamento de ar e por outros fatores como iluminação e equipamentos elétricos.

A interface é dividida em menus destinados ao preenchimento dos dados referentes ao problema tratado. Com isso o programa é capaz de calcular a capacidade requerida para aquecimento e resfriamento para diferentes sistemas de climatização, rotinas de operação do prédio e condições ambientais. Ou seja, o programa inter-relaciona a carga térmica calculada do edifício com o sistema de climatização.

O programa realiza balanços de energia (internos e externos, bem como transferência por condução, convecção e radiação) e massa (transferência de massa através dos fluxos de ar de ventilação, exaustão e infiltração). Com todos os dados devidamente inseridos, o programa realiza as simulações ao longo de um dia ou um ano inteiro solicitadas pelo programador (por exemplo, ganhos de calor através de vidros e paredes, temperatura do ar interno e externo, carga térmica, etc).

É importante notar que todos os fatores mencionados no capítulo 3 poderiam ser considerados na modelagem no Energy Plus. Entretanto, a fim de simplificar o modelo, neste trabalho alguns dos fatores foram negligenciados, ou parcialmente considerados. É o caso, por exemplo, de efeitos de sombra, luz do sol, infiltração de ar e ventilação. Outros fatores foram simplificados, ou concatenados, como é o caso da potência gerada por equipamentos dentro do edifício.

Dito isso, com as zonas térmicas e superfícies devidamente construídas e renomeadas no Google SketchUp 8, através do editor de arquivos IDFEditor inicia-se a inserção dos outros dados característicos do edifício, necessários à simulação. Além da geometria,

esses dados incluem características da cidade (localização global, altitude, clima), materiais utilizados na construção e perfis de ocupação, iluminação e uso de equipamentos. Por fim, também é fundamental a caracterização do sistema de refrigeração no programa.

4.2.1. Arquivo climático

Para várias cidades do mundo existem arquivos com os dados climáticos para os dias de alguns anos de referência. Os dados incluem temperatura de bulbo seco, pressão atmosférica, ventos, radiação solar, humidade relativa do ar e nebulosidade. O arquivo climático é indispensável à simulação de um edifício.

4.2.2. Localização do edifício e clima

O clima e a localização são fundamentais dentro das solicitações de padrões energéticos para edificações como o ASHRAE 90.1, influenciando na escolha de materiais e técnicas de construção. Conforme mencionado anteriormente, o edifício em questão localiza-se na cidade de São Paulo (SP), cujas características geográficas são mostradas na Tab. (4.2).

Tabela 4.2. Características da cidade de São Paulo.

Latitude (°S)	23,62
Longitude (°W)	46,65
Fuso horário	GMT-3
Pressão Barométrica (Pa)	92043
Altitude (m)	803

Características climáticas e ambientais médias também são importantes para caracterizar a cidade. A Tab. (4.3) destaca alguns dados necessários à simulação retirados de manuais de simulação térmica, como a própria norma 90.1. Esses dados são geralmente utilizados para o projeto dos sistemas de ar condicionado e aquecimento, e por isso são definidos para dias extremos de inverno e verão. Outros aspectos, como chuva, neve,

nuvolosidade, humidade do ar e meses mais quente e mais frio do ano também são solicitados pelo software.

Tabela 4.3. Características climáticas da cidade de São Paulo

		Inverno	Verão
Máxima temperatura de bulbo seco	°C	17,9	31
Variação diária de temperatura	°C	0	8,2
Velocidade do vento	m/s	7	3,1
Direção do vento	graus	160	330

As informações elencadas anteriormente devem ser inseridas nos menus “Site:Location” e “SizingPeriod:DesignDay” do Energy Plus. Outras informações eventualmente podem vir do arquivo de clima referente à cidade de São Paulo como é o caso, por exemplo, das temperaturas do solo.

4.2.3. Materiais e elementos construtivos

Normas envolvidas com eficiência energética de construções são bem exigentes no que diz respeito à escolha dos materiais utilizados na construção do edifício. São especificados limites para isolamento (contra infiltração de ar e umidade) e coeficiente de transferência de calor de pisos, paredes e tetos.

Os níveis de eficiência de portas e janelas levam em conta perda e ganho de calor (dependendo de qual predomina para a época do ano ou localização geográfica) e iluminação solar. Dessa forma é preciso atenção na escolha dos materiais corretos para cada construção de maneira a estar de acordo com as recomendações.

A norma 90.1 reúne em zonas climáticas as cidades do mundo que teoricamente apresentam climas semelhantes ao longo de um ano típico. De acordo com a zona climática, a utilidade e a estrutura da construção, a norma recomenda coeficientes de transferência de calor e insuflação para paredes, pisos, tetos e janelas, que são adotados neste trabalho.

A cidade de São Paulo foi enquadrada pela norma na zona climática 2, o edifício estudado é comercial e sua estrutura, fundamentalmente metálica. Assim, são estabelecidos valores para o coeficiente global de troca de calor de paredes, pisos e tetos. Para janelas, além desse coeficiente, é também definido o coeficiente de ganho solar de calor.

A Tab. (4.4) mostra os requisitos construtivos da norma para um prédio localizado na zona climática 2 e de estrutura metálica. A tabela 4.5 mostra as propriedades dos elementos construtivos, de maneira a atender aos requisitos da Tab. (4.4). Um material virtual também foi criado de forma a negligenciar a presença das paredes fictícias mencionadas na seção 4.1.

Tabela 4.4. Requisitos estabelecidos pela norma 90.1 (ASHRAE, 2007) para edifício de estrutura metálica localizado na zona climática 2.

Propriedade	Unidade	Paredes	Tetos	Pisos	Janelas
Coeficiente de troca de calor	$W/(m^2 \cdot K)$	0,642	0,369	0,295	3,975
Isolamento mínimo	$m^2 \cdot K/W$	3,522	3,346	6,692	-
Coeficiente de ganho de calor solar	[-]	-	-	-	0,25

Tabela 4.5. Propriedades dos elementos construtivos – zona climática 2.

Propriedade	Unidade	Paredes				Piso			Teto		
		argamassa	bloco de concreto	lã de rocha	gesso	concreto	isopor	contra piso	concreto	isopor	contra piso
condutividade térmica	W/(m·K)	0,65	0,91	0,03	0,35	1,75	0,04	1,28	1,75	0,04	1,28
densidade	kg/m^3	1600	1700	190	1200	2400	30	2000	2400	30	2000
calor específico	J/(kg·K)	754	1005	754	910	1005	1000	1005	1005	1000	1005
espessura	m	0,020	0,190	0,038	0,015	0,105	0,132	0,025	0,100	0,100	0,025

É importante que se diga que as espessuras dos elementos isolantes (lã de rocha e isopor) foram calculadas de forma a ajustar o resultado do coeficiente de transferência de calor predefinido pela norma 90.1 apresentado na Tab. (4.4). Os materiais, propriedades e espessuras utilizados são bastante próximos aos utilizados na realidade.

As propriedades dos materiais devem ser inseridas no menu "*Materials*" do IDFEditor, e em seguida os materiais recém-criados no programa devem ser devidamente atribuídos aos elementos construtivos (paredes, pisos, tetos e janelas) no menu "*Construction*". Isso significa que a um objeto nomeado "Parede", por exemplo, são atribuídas no programa as diferentes camadas de materiais conforme a coluna "Paredes" da tabela 4.5. O mesmo é feito para todos os outros tipos de elementos construtivos.

Em seguida, no menu "*BuildingSurface:Detailed*" do IDFEditor, onde já estavam inseridas as informações de todas as superfícies do modelo previamente concebido no Google SketchUp 8, deve-se verificar as características atribuídas a cada superfície está de acordo com sua natureza construtiva. Em outras palavras, uma parede comum deve ter como elemento construtivo associado "Parede", enquanto que uma parede fictícia deve ser associada ao elemento "Parede fictícia" (cujas propriedades correspondem às da Tab. 4.1), e assim por diante.

Procedimento idêntico deve ser aplicado às janelas, porém o último passo é implementado no menu "*FenestrationSurface:Detailed*".

4.2.4. Perfis de utilização e cargas internas

Conforme explicado na seção 2.3, características fundamentais de uma edificação são as formas como ela é ocupada, bem como as taxas de utilização de equipamentos e iluminação. Como foi dito na mesma ocasião, o perfil de ocupação é considerado igual ao de equipamentos, o que de certa forma é bem próximo da realidade.

Além disso, considera-se também aqui as sugestões de perfis presentes na norma 90.1 para prédios de escritórios. Quanto aos níveis de atividade dentro do prédio (isto é, a quantidade de calor gerado internamente pelas pessoas, pelo sistema de iluminação e pelos equipamentos) são seguidas recomendações da diretiva e da norma NBR 16401.

A eficiência energética para iluminação é melhorada pelo uso de fontes eficientes de luz, considerando o número e a distribuição das luminárias ao longo do espaço, bem como

avaliando sistemas de controle para uma boa operação. Os códigos de eficiência energética fornecem critérios mínimos a serem obedecidos pelo sistema de controle.

A norma 90.1, preocupada com a eficiência energética, define que a quantidade de calor gerado pelo sistema de iluminação de um edifício de escritórios deve ser de 12 W/m^2, mas não é específica no que diz respeito à densidade de pessoas e equipamentos, nem quanto às taxas de geração de calor de ambos. Por isso lança-se mão da norma NBR 16401, que estabelece, para edifícios de escritório com equipamentos trabalhando em carga média/alta (considerado como o caso de referência neste estudo), densidade de pessoas de 9,3 m^2 por pessoa e 16,2 W/m^2 provenientes do uso dos equipamentos (vide Tab. 4.6 retirada da NBR 16401).

Tabela 4.6. Carga térmica gerada por equipamentos de escritório e densidade de pessoas.

Tipo de carga	Densidade W/m^2	Descrição do escritório Assumindo:
Média/alta	16,2	9,3 m^2 por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.

É importante mencionar que a zona central do prédio, destinada a elevadores e escadas, também apresenta alguma atividade, naturalmente inferior à do escritório em si. Foram estabelecidos neste estudo níveis iguais à metade daqueles verificados nas outras zonas, ou seja, 6 W/m^2 para iluminação, 8,1 W/m^2 para equipamentos e 18,6 m^2 por pessoa. Além disso, como a norma 90.1 define um perfil de uso de elevadores, este é implementado no Energy Plus e atribuído a essa zona.

A NBR 16401 (ABNT, 2008) traz ainda informações sobre o calor gerado por pessoas realizando as mais diversas atividades. No caso de pessoas sentadas, com trabalho leve em hotéis, apartamentos e escritórios, o valor estabelecido na norma é de 115 W. Por

conveniência, esse valor foi considerado constante ao longo de todo o dia de trabalho, para todos os dias do ano.

Os dados correspondentes aos ganhos internos de calor são introduzidos no programa pelo menu "*Internal gains*", submenus "*People*", "*Lights*" e "*ElectricEquipments*". O nível de atividade e os perfis de ocupação, iluminação, equipamentos e elevadores ao longo do dia (seção 2.3) são inseridos no menu "*Schedule:Compact*". Neste mesmo menu também é definida a taxa de calor emitida por uma pessoa.

4.2.5. Sistema de refrigeração

Sistemas de climatização são compostos por equipamentos que condicionam o ar fazendo-o passar por vias, regulando a quantidade a ser direcionada para recirculação ou exaustão.

A eficiência desses sistemas pode ser melhorada tanto pela utilização de equipamentos que utilizem energia de forma eficiente, quanto por meio de economizadores, que possibilitam o uso automático do ar externo ou permitem que usuários regulem as condições do ambiente. Normas de energia apresentam critérios mínimos para as dimensões de sistemas de climatização, tendo em vista a demanda energética do edifício.

Como mencionado na seção 1.5, o sistema de refrigeração do edifício em estudo possui três circuitos térmicos, sendo um ciclo de refrigeração, um para rejeição de calor, e outro para condicionamento do ar propriamente dito. A Fig. (4.7) mostra um esquema mais detalhado do sistema. As setas representam os sentidos de circulação dos fluidos.

Conforme explicado, a água gelada, que é uma mistura de água e um sal denominada fluido intermediário, escoando pelos anéis primário e secundário é resfriada ao perder calor para o evaporador do refrigerador ("*chiller*"). O fluido intermediário então é bombeado para os andares do edifício, onde trocará calor com o ar a ser enviado para os ambientes internos.. Ao ganhar calor do ar, o fluido retorna "aquecido" ao *chiller*, onde torna a perder calor no evaporador, repetindo o ciclo. Em geral a água gelada entra no *chiller* a uma temperatura próxima a 12°C e sai a aproximadamente 7°C.

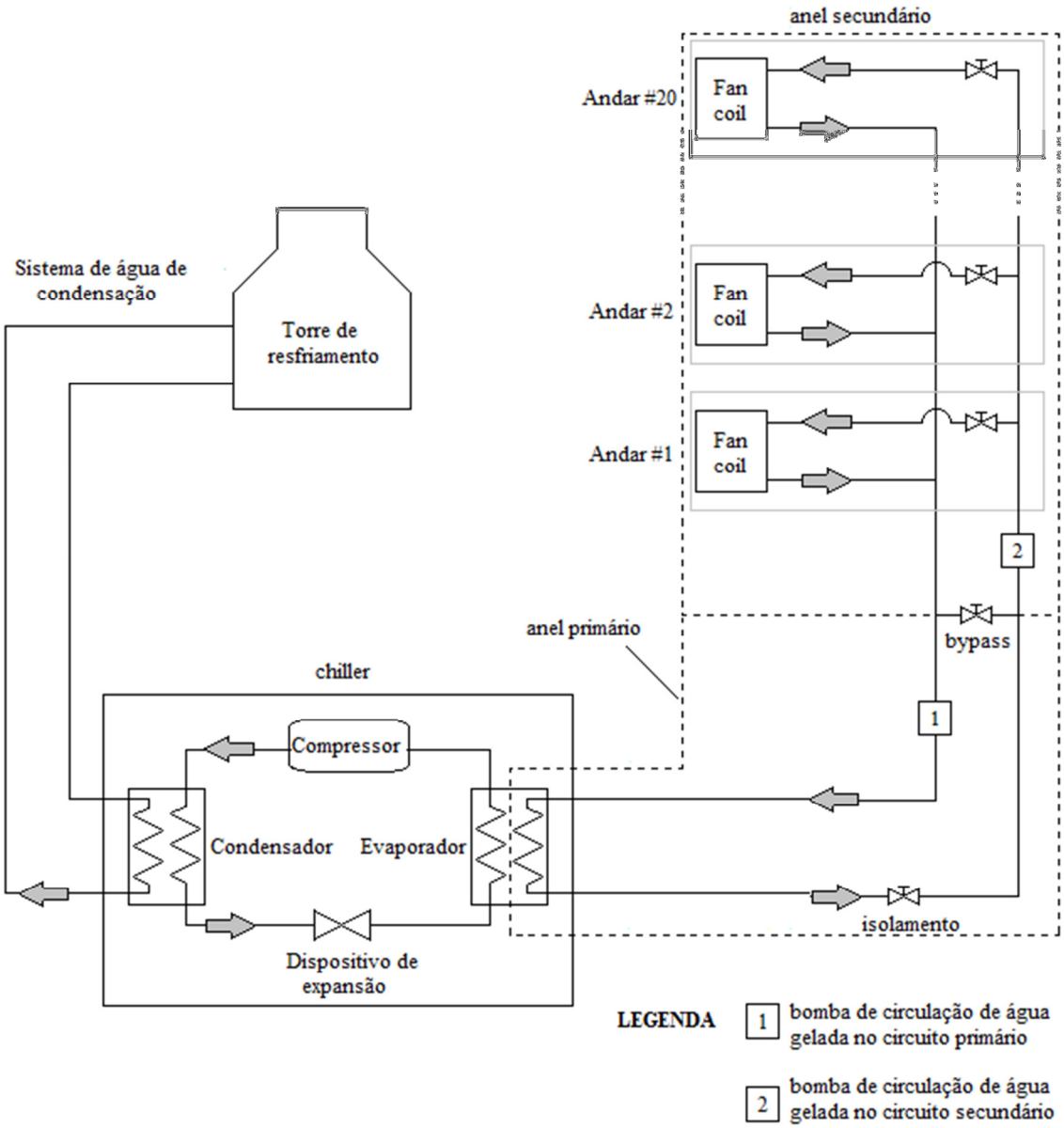

Figura 4.7. Detalhamento dos circuitos do sistema de refrigeração.

O fluido refrigerante no circuito do *chiller* inicialmente ganha calor do sistema de água gelada no evaporador. Então o fluido refrigerante (na fase vapor) é comprimido e, em seguida, rejeita calor no condensador, retornando à fase líquida, expandindo-se para novamente ganhar calor no evaporador, repetindo o ciclo.

O sistema de água de condensação tem como função rejeitar o calor do condensador do *chiller* para o meio externo. Para isso, ao receber o calor no condensador, a água de condensação é bombeada para uma torre de resfriamento, rejeitando calor para o meio externo, e retornando mais fria até o condensador. A água retorna mais fria ao condensador, onde volta a receber calor. Indicativamente a água do sistema de condenção chega ao condensador a 29°C e sai a 34°C.

No sistema de bombeamento de água gelada, pode-se ter diversas configurações no que diz respeito ao controle de vazão nos anéis primários e secundários (vide Fig. 4.7). Na Fig. (4.7) são apresentados os principais elementos desse sistema, que são as bombas nos circuitos primário e secundário (identificados como "1" e "2" na Fig. 4.7). Nas diversas configurações possíveis do sistema, essas bombas podem estar presentes (ou não) em ambos os circuitos, e podem apresentar rotação constante ou variável, de acordo com a presença de dispositivos denominados variadores de frequência.

Na Fig. (4.7) são mostradas também as válvulas de controle do sistema, sendo uma de isolamento (para impedir refluxo), uma de *bypass* (para controlar a vazão no anel primário) e outras nos andares (para possibilitar o controle da vazão de acordo com a demanda por climatização em cada andar).

Alguns autores como Kisner (1996) e Taylor (2002) mostram que sistemas de climatização com bombas variáveis somente no anel primário (e portanto sem sistema de bombeamento no secundário) apresentam consumo energético menor que o sistema convencional utilizado nos Estados Unidos, com acionamento em ambos os anéis (primário constante e secundário variável).

Este trabalho avalia quatro configurações para o sistema de acionamento do circuito de água gelada: (1) acionamento variável no anel primário, e constante no secundário; (2) acionamento constante no primário, sem secundário (esta configuração corresponde à referência mais utilizada no mercado brasileiro), (3) acionamento constante no anel primário, variável no anel secundário e (4) acionamento variável no primário, sem

secundário. O intuito é comparar o impacto de cada configuração no consumo de energia elétrica em um edifício comercial típico climatizado.

O edifício estudado possui um sistema de distribuição de ar do tipo caixas VAV[4]. Trata-se de um tipo de distribuição do ar para dentro dos ambientes climatizadas após ter sido condicionado durante a troca de calor com o circuito de água gelada.

Para os ambientes climatizados do edifício (isto é, as quatro zonas de seção trapezoidal) são fornecidas vazões de ar por meio das referidas caixas VAV, que são na realidade equipamentos reguladores dessas vazões às zonas. O ar fornecido aos ambientes é distribuído por um sistema de dutos ligado a um ventilador, cuja rotação pode ser variada de acordo com a demanda por climatização.

No sistema de refrigeração está presente também uma caixa de mistura em que o ar que retorna do ambiente climatizado é misturado com o ar proveniente do ambiente externo. O controle desses fluxos é feito de acordo com a temperatura do ambiente, fornecida por um termostato. Nessa caixa de mistura pode ocorrer também o aquecimento do ar de forma a obter um controle mais refinado sobre a temperatura do ar a ser enviado para os dutos.

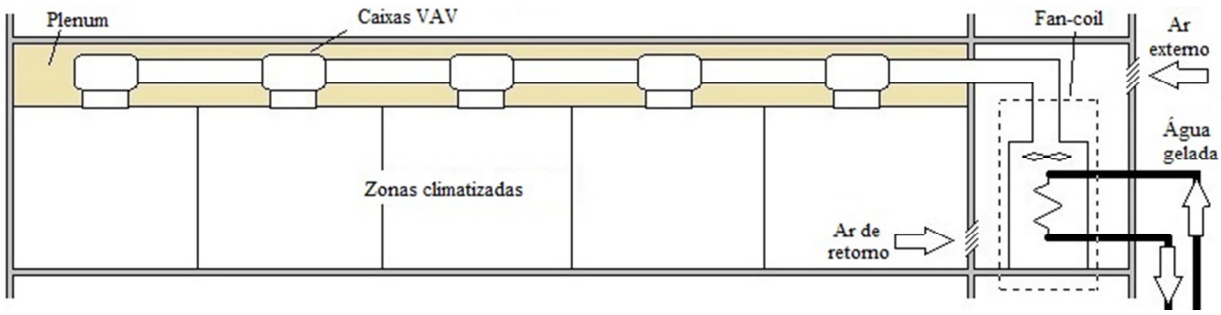

Figura 4.8. Sistema de dutos de ventilação e caixas VAV.

No que diz respeito ao resfriamento do ar, este é realizado por meio de um equipamento denominado *fan-coil*, que consiste em um ventilador acoplado a um trocador de calor. Ali o ar flui por entre os tubos da serpentina, dentro dos quais escoa o fluido do sistema

[4] "Variable air volume". Do inglês, volume de ar variável.

de água gelada. Esta água, após ganhar calor do ar refrigerado no *fan-coils*, retorna aquecida ao *chiller*, conforme explicado nesta seção. A Fig. (4.8) mostra o esquema do sistema de distribuição de ar de um andar típico do edifício.

Dessa forma, a inserção dos dados no Energy Plus inicia com a definição do termostato (menu "*HVACTemplate:Thermostat*"), cujos *setpoints* de aquecimento e resfriamento foram previamente estabelecidos no menu "*Schedule:Compact*". No caso de aquecimento define-se uma temperatura de 15°C das 8:00 às 18:00, e 20°C no restante do tempo. No resfriamento foi estabelecido o setpoint de 24°C das 8:00 às 18:00, e 30°C em outros horários.

Em seguida definem-se as características do sistema de distribuição do ar (menu "*HVACTemplate:System:VAV*"). Mais precisamente são inseridos dados de acionamento do sistema de climatização (cujo perfil havia sido definido no menu "*Schedule:Compact*"), valores de eficiência do ventilador, perda de carga do escoamento pelo ventilador, posicionamento do ventilador e características das serpentinas de aquecimento e resfriamento.

Com o sistema caracterizado são definidas as especificações para cada zona climatizada ("*HVACTemplate:Zone:VAV*"). Entre elas estão características das caixas VAV, como fração mínima da vazão de ar máxima (coeficiente de fechamento do *damper* da caixa), e outras como a vazão de renovação do ar externo por pessoa.

O próximo passo é a caracterização do escoamento do fluido no circuito do *chiller* no programa (preenchimento do menu "*HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop*"). Entre outros são inseridos dados de vazão (constante ou variável nos circuitos primário e secundário), perda de carga no escoamento, e temperaturas de saída dos fluidos do anel secundário e do sistema de água de condensação.

O *chiller* considerado é do tipo elétrico-alternante, e a torre de resfriamento apresenta velocidade única. O circuito de água de condensação é implementado de maneira

semelhante ao circuito do *chiller*, e com isso encerra-se a modelagem do problema no Energy Plus.

5. TARIFAS DE ENERGIA

A compreensão da forma como é cobrada a energia elétrica e como são calculados os valores apresentados nas contas de luz é fundamental para a tomada de decisão em relação a projetos de eficiência energética. A conta de luz reflete o modo como a energia elétrica é utilizada e sua análise por um período de tempo adequado, permite estabelecer relações importantes entre hábitos e consumo.

Dadas as alternativas de enquadramento tarifário disponíveis para alguns consumidores, o conhecimento da formação da conta e dos hábitos de consumo permite escolher a forma de tarifação mais adequada e que resulta em menor despesa com a energia elétrica. Para o melhor entendimento dos sistemas de tarifação, alguns esclarecimentos constam no manual da ANEEL[5].

Potência, simplificadamente, é a capacidade de consumo de um aparelho elétrico. A potência vem escrita nos manuais dos aparelhos, sendo expressa em watts (W) ou quilowatts (kW). Energia é a quantidade de energia elétrica utilizada por um aparelho ao ficar ligado por certo tempo, e tem como unidades mais usuais o quilowatt-hora (kWh) e o megawatt-hora (MWh).

Na conta de energia elétrica dos pequenos consumidores, como por exemplo residências, cobra-se apenas a energia utilizada (“consumo”). Médios e grandes consumidores pagam tanto pela energia quanto pela potência. A potência aparece nas contas desses consumidores com o nome de “demanda”, que corresponde à potência média verificada em intervalos de 15 minutos.

No que se refere ao período do dia em que a energia é utilizada, define-se “horário de ponta” como um período de três horas consecutivas exceto sábados, domingos e feriados nacionais, estabelecido pela concessionária em função das características de seu sistema elétrico. Em algumas modalidades tarifárias, nesse horário a demanda e o consumo de

[5] Agência Nacional de Energia Elétrica.

energia elétrica tem preços mais elevados. O chamado “horário fora de ponta” corresponde às demais 21 horas do dia.

O período do ano também influencia no preço da energia, devido à diferença dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Assim, para efeito de tarifação, o ano é dividido em dois períodos, um período seco que compreende os meses de maio a novembro (7 meses) e um período úmido, que compreende os meses de dezembro a abril (5 meses). Em algumas modalidades tarifárias, no período seco o consumo tem preços mais elevado

As tarifas também variam de acordo com o padrão de consumo. Dessa forma, os consumidores são classificados pelo nível de tensão em que são atendidos. Os consumidores atendidos em baixa tensão, em geral em 127 ou 220 volts, como residências, lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais e boa parte dos edifícios comerciais, são classificados no Grupo B. O Grupo B é dividido em sub-grupos, de acordo com a atividade do consumidor.

Os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais, são classificados no Grupo A. Esse grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento (tabela 5.1). Com base em todo o exposto, é possível caracterizar as diferentes modalidades tarifárias praticadas.

Tabela 5.1. Subgrupos do grupo A

Subgrupo	Tensão de Fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo

5.1. Modalidades tarifárias

Existem duas as modalidades tarifárias. Os consumidores do Grupo B (baixa tensão) são enquadrados em uma tarifa monômia, isto é, são cobrados apenas pela energia que consomem.

Os consumidores do Grupo A estão sujeitos a uma tarifa binômia, isto é, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Estes consumidores podem enquadrar-se em uma de três alternativas tarifárias: tarifação convencional, tarifação horo-sazonal Verde, ou tarifação horo-sazonal Azul[6] (compulsória para aqueles atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV).

5.1.1. Tarifação convencional

O enquadramento na tarifa convencional exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor ("Demanda Contratada"), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido).

Os consumidores do Grupo A, sub-grupos A3a, A4 ou AS, podem ser enquadrados na tarifa convencional quando a demanda contratada for inferior a 300 kW, desde que não tenham ocorrido, nos 11 meses anteriores, 3 (três) registros consecutivos ou 6 (seis) registros alternados de demanda superior a 300 kW.

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. A parcela de consumo é calculada multiplicando-se o consumo medido pela Tarifa de Consumo:

$$P_{consumo} = Tarifa\ de\ Consumo \times Consumo\ Medido.$$

[6] As tarifações horo-sazonal Verde e Azul são referidas neste trabalho por HSV e HSA, respectivamente.

A parcela de demanda é calculada multiplicando-se a Tarifa de Demanda pela Demanda Contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em 10% a Demanda Contratada:

$$P_{demanda} = Tarifa\ de\ Demanda \times Demanda\ Contratada.$$

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a Demanda Contratada e é calculada multiplicando-se a Tarifa de Ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a Demanda Contratada. Na tarifação Convencional, a Tarifa de Ultrapassagem corresponde a três vezes a Tarifa de Demanda:

$$P_{ultrap.} = Tarifa\ de\ Ultrap. \times (Demanda\ Medida - Demanda\ Contratada).$$

5.1.2. Tarifação horo-sazonal Verde

O enquadramento na tarifa Verde dos consumidores do Grupo A, sub-grupos A3a, A4 e AS, é opcional. Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor ("Demanda Contratada"), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta).

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem. A parcela de consumo é calculada observando-se nas tarifas o período do ano. No período seco (maio à novembro) as tarifas de consumo na ponta e fora de ponta são mais caras que no período úmido:

$$P_{consumo} = Tarifa\ de\ Consumo_{ponta} \times Consumo\ Med._{ponta} + Tar.\ de\ Cons._{fora\ de\ ponta} \times Cons.\ Med._{fora\ de\ ponta}$$

A parcela de demanda é calculada multiplicando-se a Tarifa de Demanda pela Demanda Contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em 10% a

Demanda Contratada. A tarifa de demanda é única, independente da hora do dia ou período do ano.

$$P_{demanda} = Tarifa\ de\ Demanda\ x\ Demanda\ Contratada.$$

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a Demanda Contratada e é calculada multiplicando-se a Tarifa de Ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a Demanda Contratada:

$$P_{ultrap.} = Tarifa\ de\ Ultrap. \times (Demanda\ Medida - Demanda\ Contratada).$$

5.1.3. Tarifação horo-sazonal Azul

O enquadramento dos consumidores do Grupo A na tarifação horo-sazonal azul é obrigatório para os consumidores dos sub-grupos A1, A2 ou A3. Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua tanto o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta ("Demanda Contratada na Ponta") quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta ("Demanda Contratada fora de Ponta").

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. Em todas as parcelas observa-se a diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta. A parcela de consumo é calculada através da expressão abaixo, observando-se nas tarifas o período do ano. As tarifas de consumo na ponta e fora de ponta são diferenciadas por período do ano, sendo mais caras no período seco (maio a novembro):

$$P_{consumo} = Tarifa\ de\ Consumo_{ponta} \times Consumo\ Medido_{ponta} + Tarifa\ de\ Cons._{fora\ de\ ponta} \times Consumo\ Medido_{fora\ de\ ponta}.$$

A parcela de demanda é calculada somando-se o produto da Tarifa de Demanda na ponta pela Demanda Contratada na ponta (ou pela demanda medida na ponta, de acordo com

as tolerâncias de ultrapassagem) ao produto da Tarifa de Demanda fora da ponta pela Demanda Contratada fora de ponta (ou pela demanda medida fora de ponta, de acordo com as tolerâncias de ultrapassagem). As tarifas de demanda não são diferenciadas por período do ano:

$$P_{consumo} = Tarifa\ de\ Dem._{ponta} \times Demanda\ Contr._{ponta} + Tarifa\ de\ Dem._{fora\ de\ ponta} \times Demanda\ Contr._{fora\ de\ ponta}.$$

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa a Demanda Contratada acima dos limites de tolerância. Esses limites são de 5% para os sub-grupos A1, A2 e A3 e de 10% para os demais sub-grupos. É calculada multiplicando-se a Tarifa de Ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a Demanda Contratada. As tarifas de ultrapassagem são diferenciadas por horário, sendo mais caras nas horas de ponta:

$$P_{ultrap.} = Tar.Ultr._{ponta} \times (Dem.Med. - Dem.Contr.)_{ponta}$$

$$+ Tar.Ultr._{fora\ ponta} \times (Dem.Med. - Dem.Contr.)_{fora\ ponta}.$$

5.2. Energia elétrica reativa e fator de potência

Além da energia ativa, considerada até este momento, existe outro tipo de energia elétrica, denominada energia reativa. Essa é uma energia diferente, pois não realiza trabalho útil e produz perdas por provocar aquecimento nos condutores. A energia reativa tem como unidades de medida usuais o VArh e o kVArh (que corresponde a 1000 VArh) e a potência reativa a unidade de VAr ou kVAr.

Até certo limite, as concessionárias não são autorizadas a cobrar essa energia e até recentemente não a cobravam dos consumidores do Grupo B mesmo quando o limite era excedido. Esse panorama pode mudar em breve, mas o fato é que a cobrança, em geral, é encontrada apenas nos consumidores do Grupo A.

O limite é indicado de forma indireta, através de um parâmetro denominado fator de potência, que reflete a relação entre as energias ativa e reativa consumidas. A ANEEL estabelece que as instalações elétricas dos consumidores devem ter um fator de potência não inferior a 0,92 (reativo ou indutivo).

Pela energia reativa, os consumidores do Grupo A são cobrados da mesma forma que pela energia ativa, apenas mudam as medições e os nomes. Os consumidores do Grupo A, tarifa Convencional, pagam tanto o consumo de energia reativa (UFER) quanto a demanda reativa (UFDR), como segue:

$$FER = Tarifa\ de\ Consumo\ x\ UFER \text{ e } FDR = Tarifa\ de\ Demanda\ x\ UFDR.$$

(FER: Faturamento de Energia Reativa e FDR: Faturamento de Demanda Reativa). Os consumidores do Grupo A, tarifa Verde, pagam o consumo de energia reativa na ponta e fora de ponta (UFER) e a demanda reativa (UFDR), segundo as expressões a seguir:

$$FER = Tar.de\ Consumo_{ponta} \times UFER_{ponta} + Tar.de\ Consumo_{fora\ ponta} \times UFER_{fora\ ponta}, FDR = Tarifa\ de\ Demanda \times UFDR.$$

Os consumidores do Grupo A, tarifa Azul, pagam tanto o consumo de energia reativa (UFER) quanto da demanda reativa (UFDR), para as horas de ponta e horas fora de ponta. A energia reativa cobrada e a demanda reativa são calculadas pelas expressões que seguem (não existe cobrança de ultrapassagem para a demanda reativa):

$$FER = Tarifa\ de\ Consumo_{ponta} \times UFER_{ponta} + Tarifa\ de\ Consumo_{fora\ ponta} \times UFER_{fora\ ponta}, FDR = Tarifa\ de\ Demanda\ na\ Ponta \times UFDR\ na\ Ponta + Tarifa\ de\ Demanda\ fora\ de\ Ponta \times UFDR\ fora\ de\ Ponta.$$

Conforme mencionado em seções anteriores, a presença de variadores de frequência de grande capacidade ou em grande quantidade aumenta a potência reativa do sistema, reduzindo seu fator de potência, o que pode implicar em aumento dos encargos relativos à energia elétrica.

6. SIMULAÇÕES

O intuito principal deste trabalho é a comparação de diferentes configurações do sistema de circulação de água gelada em sistemas de climatização para um edifício comercial típico. Para esta comparação serão realizadas simulações para as quatro configurações descritas anteriormente. Além disso, para avaliar o impacto dessas configurações para diferentes níveis de ocupação de uma edificação comercial, são realizadas simulações nas quais também é modificado o perfil de ocupação da edificação. Nesses casos, serão utilizados níveis de ocupação/equipamentos e de iluminação descritos na norma NBR 16401 (ABNT, 2008) e que são apresentados na Fig. (6.1). Deve-se ressaltar que para cada configuração do sistema de circulação de água gelada, serão realizadas todas as variações dos perfis de ocupação apresentados na Fig. (6.1).

Uma vez simulado o sistema, obtêm-se resultados de consumo energético para cada mês do ano, bem como a discretização das contribuições de cada fonte de consumo para o total (equipamentos, luzes, ventiladores, bombas, resfriamento e calor rejeitado). Em seguida são implementadas alterações no modelo, de maneira a verificar como diferenças na intensidade de utilização do prédio e vazões de fluidos refrigerantes nos circuitos térmicos influenciam no consumo do edifício.

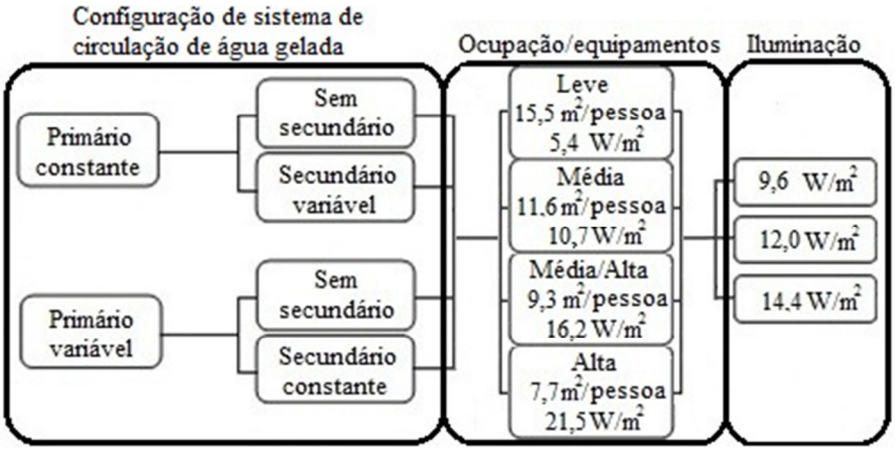

Figura 6.1. Simulações.

Na realidade são propostas quatro configurações do sistema de circulação de água gelada (vazão constante e variável nos anéis primário e secundário do sistema). Além disso quatro intensidades de ocupação/equipamentos e três de iluminação são implementadas, e todas as $4 \cdot 4 \cdot 3 = 48$ combinações possíveis são simuladas, e os resultados, comparados. A Fig. (6.1) reúne todas as simulações a serem realizadas, bem como traz as alterações presentes em cada uma delas.

Para proceder com as comparações, a configuração a ser adotada como referência será: acionamento do anel primário constante, sem secundário, intensidade média/alta para ocupação/equipamentos e iluminação 12 W/m^2. Em cada simulação obtêm-se resultados de consumo de energia elétrica para cada mês do ano, bem como a contribuição de cada fonte de consumo no consumo de energia total (equipamentos, luzes, ventiladores, bombas e resfriadores). Em seguida são implementadas alterações no modelo, de maneira a verificar como diferenças na intensidade de utilização do prédio e vazões de fluidos intermediários no sistema de circulação de água gelada influenciam no consumo de energia da edificação.

Deve-se ressaltar que o tipo de ocupação (leve, média, média/alta e alta) define simultaneamente o calor liberado por equipamentos e a taxa de ocupação dos ambientes. Em outras palavras, essas características estão atreladas, e não podem ser alteradas independentemente, conforme mostrado na Fig. (6.1).

Com base nos resultados obtidos como o consumo anual de energia pelo sistema de climatização e os gastos financeiros totais com fornecimento de eletricidade, é conveniente identificar as fontes de consumo mais relevantes, e principalmente verificar se ocorrem variações significativas dessas parcelas para as variações propostas anteriormente.

Por fim, são realizadas mais algumas simulações para o mesmo edifício com a configuração denominada de referência localizado em outras cidades brasileiras (Rio de Janeiro e Salvador). O intuito dessas simulações é verificar como as características climáticas locais influeciam no consumo de energia elétrica do edifício.

6.1. Resultados da simulação para o edifício de referência

O Energy Plus realiza cálculos de acordo com as solicitações do programador e das características do edifício modelado. As saídas de interesse no caso em estudo são: consumo de eletricidade por fonte de uso e gastos financeiros anuais do edifício. Sendo assim a Tab. (6.1) resume os principais resultados obtidos para a simulação da edificação denominada aqui como referência.

Tabela 6.1. Resultados anuais do sistema de climatização de referência (primário constante, sem secundário) nas condições de referência.

Ventiladores (MWh)	Bombas (MWh)	Chiller (MWh)	Calor rejeitado (MWh)	Climatização total (MWh)	Gasto financeiro anual total do edifício (R$)
127,11	134,62	1046,73	24,32	1332,78	809.664,02

As Fig. (6.2) e (6.3) apresentam graficamente os resultados obtidos ao longo do ano, e possibilitam visualizar as principais fontes de consumo do edifício.

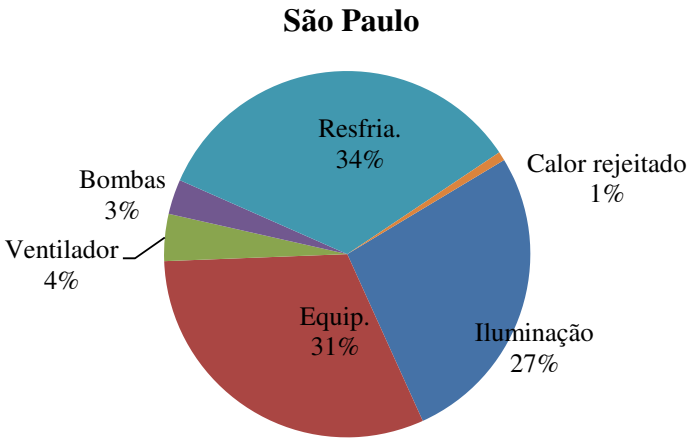

Figura 6.2. Matriz de consumo desagregado de energia elétrica – São Paulo.

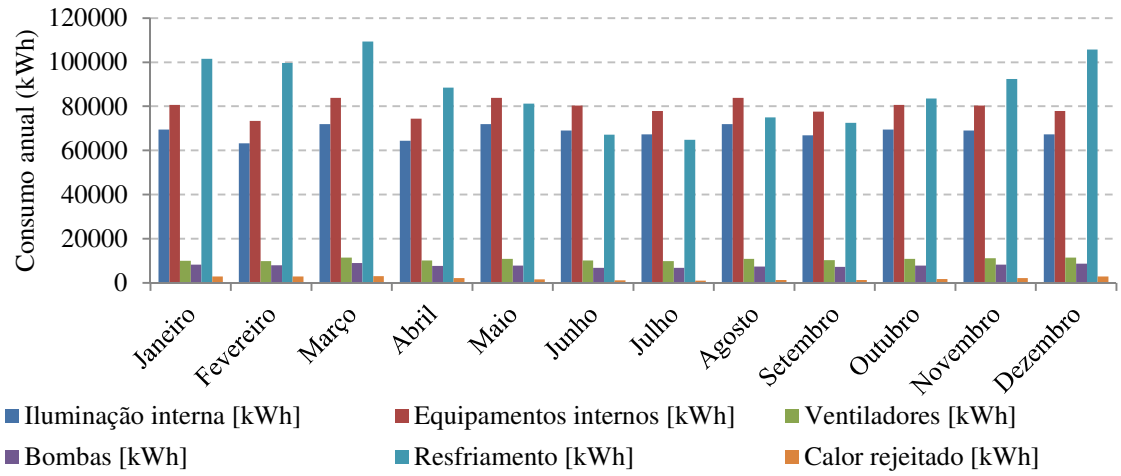

Figura 6.3. Distribuição do consumo de energia mensal.

Os resultados obtidos pela simulação da edificação de referência mostram que o sistema de climatização (a saber, resfriador, bombas, ventiladores e calor rejeitado na torre de resfriamento) é responsável por 42% de todo o consumo energético anual do edifício. Equipamentos e iluminação interna consomem o restante, embora individualmente sejam menos expressivos.

Além disso, na Fig. (6.3) é possível observar que (como esperado) o consumo energético do sistema de refrigeração é maior de novembro a março, mostrando coerência dos resultados pois trata-se do período mais quente do ano. Pode-se acrescentar que o consumo de energia de equipamentos e iluminação variam pouco de mês a mês.

Em vista dos resultados de referêcia cria-se um padrão de comparação do mesmo edifício equipado com diferentes sistemas de vazão nos circuitos primário e secundário. É importante enfatizar que o regime de vazões de referência (primário variável e sem bombas no secundário) segue a sugestão da norma 90.1, e por isso foi escolhida para referenciar os outros resultados.

6.2. Resultados das demais simulações

Os resultados das demais configurações propostas neste estudo mostram que para intensidades de iluminação, ocupação e utilização de equipamentos menores, o edifício tem níveis de consumo de energia menores. Por outro lado, para configurações onde os índices de utilização são mais elevados, maiores consumos de energia elétrica são verificados (vide Fig. 6.4).

No que se refere aos resultados obtidos quando da mudança de estratégias para controle de acionamento do sistema de circulação de água gelada, pode-se observar na Fig. (6.4) que os sistemas de climatização com acionamento somente no anel primário e com bombas com rotação variável apresentam menor consumo de energia. Os resultados obtidos neste trabalho concordam com outros trabalhos pesquisados, como Taylor (2002).

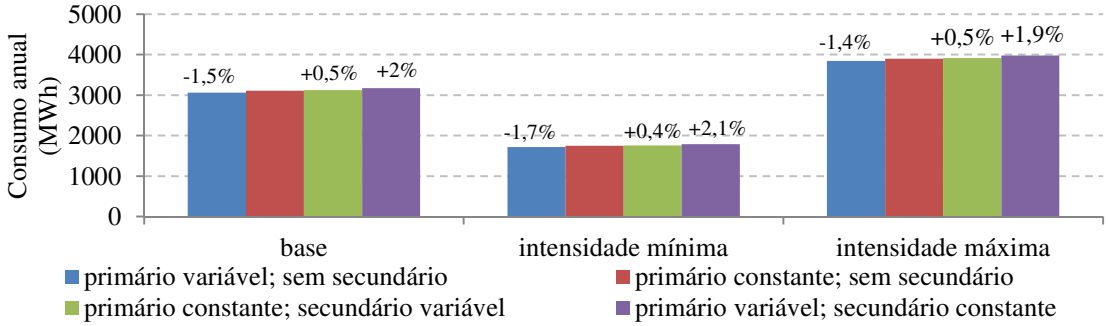

Figura 6.4. Consumo de energia elétrica anual total para as condições de uso máxima, mínima e de referência. Intensidade máxima corresponde às condições máximas de ocupação, equipamentos e iluminação; intensidade mínima corresponde às condições mínimas, conforme descrito na Fig. (6.1).

Da Fig. (6.4) observa-se que o consumo de energia elétrica, para uma dada intensidade de uso, é sempre mínimo para o sistema com bomba de rotação variável no circuito primário, e sem acionamento no secundário. Outro fato a ser ressaltado é que as diferenças percentuais de consumo de energia elétrica entre as estratégias em relação ao caso de referência é aproximadamente igual para todas as intensidades de uso.

Em comparação com a referência, a estratégia com anel primário com rotação variável e sem bombeamento no anel secundário (descrita na Fig. 6.4 como "primário variável, sem secundário") apresenta redução de 1,5%, e as outras duas estratégias apresentam aumentos de aproximadamente 0,5% e 2,0%.

Foram realizadas análises referentes aos gastos financeiros anuais com energia elétrica, onde se verificaram pequenas alterações entre a aplicação das tarifas horo-sazonais verde e azul, sendo que a tarifa verde mostrou-se ligeiramente vantajosa em todas as simulações.

Para avaliar as razões pelas quais o consumo de energia teve o comportamento aqui apresentado, lançou-se mão da comparação da contribuição de cada fonte de consumo sobre o total, e a comparação entre cada estratégia, sendo que os resultados são apresentados na Fig. (6.5).

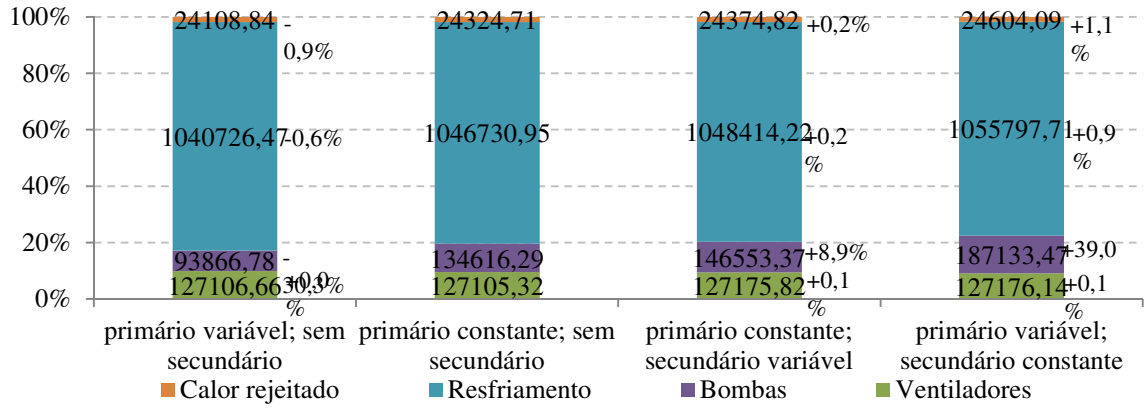

Figura 6.5. Participação percentual de cada fonte consumidora de energia para cada estratégia no consumo de energia do sistema de climatização.

As porcentagens na Fig. (6.5) referem-se à variação de cada parcela em relação à condição de referência (anel primário com rotação constante; sem bombeamento no anel secundário). Como esperado, o aumento de consumo nas configurações menos vantajosas se dá em função do aumento expressivo do consumo por bombas no anel secundário.

6.3. Resultados das simulações para outras cidades

Todos os resultados apresentados até aqui foram gerados a partir de simulações do edifício na cidade de São Paulo. A fim de entender o comportamento do mesmo prédio em outras condições climáticas e geográficas, simulações foram feitas com a edificação nas condições de referência para as cidades de Rio de Janeiro e Salvador (ambas localizadas na zona climática 1 de acordo com a classificação da norma 90.1 (ASHRAE, 2007).

Para atender as orientações da norma 90.1, foram alterados apenas os dados geográficos das cidades (latitude, longitude, altitude), a espessura da camada de isopor dos pisos e as propriedades do vidro (visto que as solicitações de transmitância térmica agora seguem os valores da zona climática 1), bem como os arquivos climáticos utilizados na simulação. A Fig. (6.6) permite comparar o consumo de energia elétrica entre as três cidades analisadas.

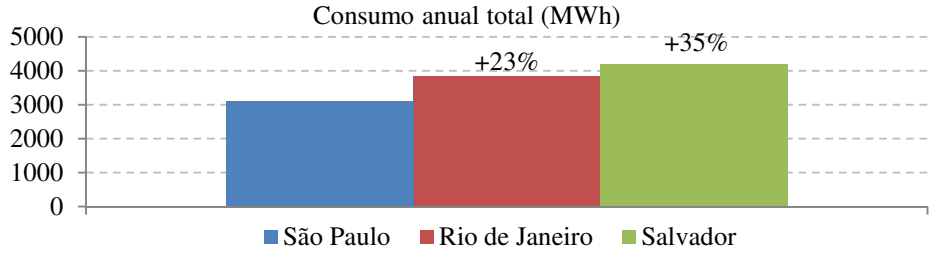

Figura 6.6. Consumo anual total de energia elétrica em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.

Observa-se que Rio de Janeiro e Salvador apresentam consumos anuais mais elevados (respectivamente 23% e 35% maiores em relação a São Paulo), devido ao clima mais quente, o que implica em maior demanda energética por parte do sistema de climatização.

A Fig. (6.7) permite avaliar que o sistema de climatização é mais requisitado nas cidades mais quentes, o que explica o consumo de energia mais elevado observado. Enquanto

que em São Paulo o sistema de climatização corresponde a 42% do total, no Rio de Janeiro essa parcela cresce para 53%, e em Salvador, 57%.

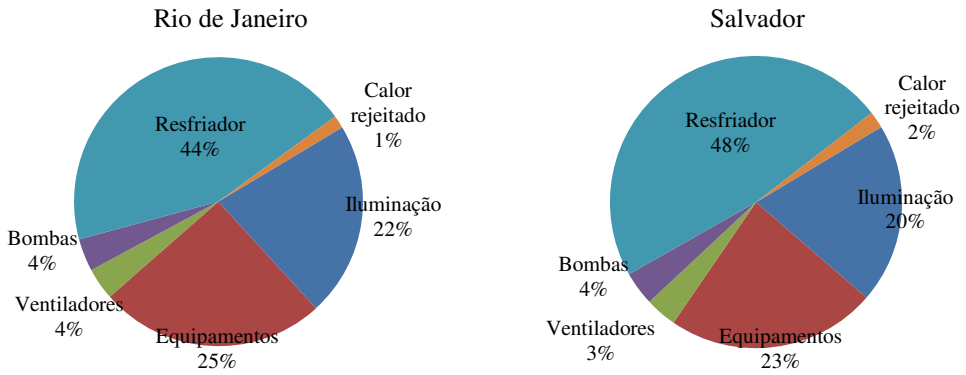

Figura 6.7. Demanda anual de eletricidade (por fonte consumidora) – Rio de Janeiro e Salvador.

A Fig. (6.8) mostra os valores de consumo de energia elétrica de cada componente do sistema de climatização, evidenciando a contribuição de cada parcela no total consumido, podendo inferir o crescimento das contribuições dos componentes desse sistema. Na Fig. (6.8), os valores percentuais correspondem às variações de consumo de energia em relação aos dados obtidos para a cidade de São Paulo.

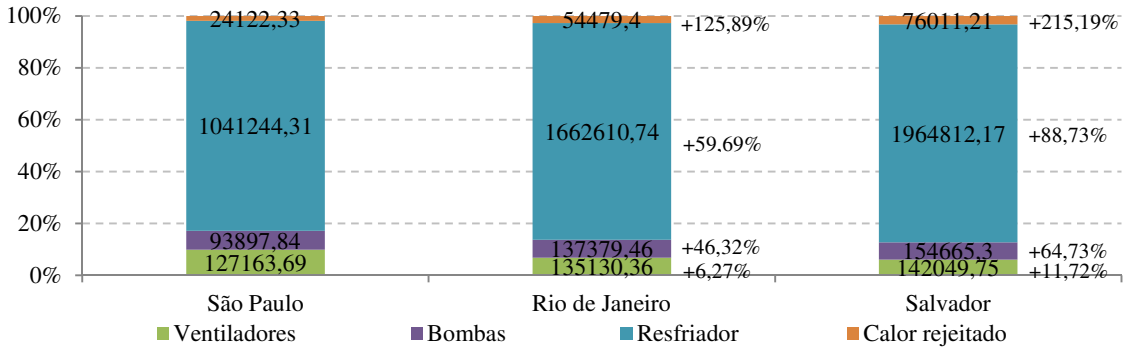

Figura 6.8. Contribuição de cada parcela no consumo do sistema de climatização do edifício para as três cidades (valores em kWh).

Na Fig. (6.9) são apresentados os resultados obtidos devido a mudança de configuração do sistema de circulação de água gelada para as três cidades analisadas. Verifica-se

inicialmente que a configuração com anel primário com rotação variável sem secundário é a solução com menor consumo de energia elétrica para as três cidades. Além disso, observa-se que as demais configurações promovem níveis de consumo de energia elétrica maiores para as cidades do Rio de Janeiro e Salvador, em relação aos níveis atingidos na cidade de São Paulo.

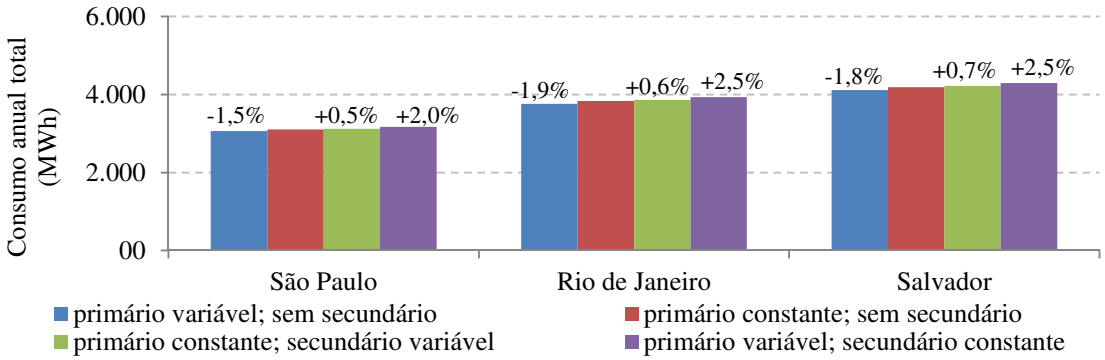

Figura 6.9. Comparativo de consumo de energia elétrica para diferentes configurações do sistema de circulação de água gelada, para as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.

6.4. Análise econômica das alternativas

Além da redução de consumo observada para algumas estratégias em comparação a outras, e consequente redução nas despesas anuais com energia elétrica, é analisado o impacto causado no orçamento com a instalação dos sistemas. Dessa maneira, é realizada uma análise econômica do projeto, visando observar se a alternativa aparentemente mais vantajosa em termos de consumo apresenta custos de instalação aplicáveis. Essa análise limita-se apenas às condições de referência, e à cidade de São Paulo.

Toda a análise parte das características das bombas dos circuitos de refrigeração. Os resultados da simulação mostram que a potência de pico consumida pelas bombas é de 12 kW, ou cerca de 15 CV, e a vazão máxima calculada é de 44 kg/s. A Tab. (6.2) reúne as opções de compra para as necessidades do projeto. Para as condições apontadas,

foram escolhidas bombas e variadores de frequência com 20 CV, e bombas com motores elétricos com 4 pólos.

Tabela 6.2. Opções de compra de equipamentos.

Preço unitário da bomba	R$	3.113,30	(4 p, 20 CV, 220 V)
	R$	2.671,40	(4 p, 15 CV, 220 V)
Preço unitário do inversor	R$	4.018,70	(20 CV)
	R$	3.373,80	(15 CV)

Para efeito de análise serão comparados os custos e a análise econômica será realizada usando como base a edificação de referência com sistema de bombeamento no anel primário com vazão constante sem bombeamento no anel secundário. A comparação será feita então com a edificação que apresentou o menor consumo, ou seja, com sistema de bombeamento primário com rotação variável sem bombeamento no anel secundário.

Além disso, definiu-se que a vida útil dos equipamentos seria de 10 anos e os valores de gastos de consumo de energia relacionados à operação do edifício foram calculados com base no valor presente com uma taxa de juros de 8% a.a (Ehrlich, 1989).

Para a avaliação de viabilidade econômica da configuração de rotação variável, calculou-se a economia gerada ao longo de 10 anos de operação e comparou-se com o custo de operação total da edificação, sendo que os resultados obtidos são apresentados na Tab. (6.3). Cabe ressaltar que nesta análise não foram incluídos efeitos de inflação e impostos e foi utilizada a estrutura tarifária horo-sazonal verde. Analisando a Tab. (6.3), pode-se inferir que o investimento nos variadores de fequência é amortizado em menos de 1 ano, podendo ser considerada uma alternativa economicamente viável.

Tabela 6.3. Resultados da análise econômica.

	Bombas	Inversores	Custo de equipamentos	Energia		
				Consumo anual	Economia em 1 ano	
Primário constante, sem secundário	1	1	R$ 7.132,00	R$ 809.664,02	R$ -	-
Primário variável, sem secundário	1	1	R$ 7.132,00	R$ 794.965,94	R$ 14.698,08	1,8%

7. CONCLUSÕES

Este trabalho estudou diferentes tipologias de sistemas de acionamento de circulação de água gelada, comparando-as a fim de identificar a que apresenta menor consumo de energia elétrica. A análise foi feita para um edifício de escritórios, localizado na cidade de São Paulo, sob diferentes intensidades de uso (intensidade de luzes, equipamentos e pessoas), para identificar a influência desses fatores no consumo de energia elétrica.

Em comparação com os resultados de referência, intensidades mais elevadas de ocupação apresentaram consumos até 30% maiores, o que também refletiu no levantamento de despesas com energia (com aumentos da mesma ordem). Naturalmente, cargas mais leves trazem menores consumos e gastos (reduções de até 44% foram verificadas).

Em paralelo, as variações no controle de acionamento dos sistemas de circulação de água gelada nos anéis primário e secundário do sistema de climatização foram variados para 3 condições diferentes. Algumas publicações (Taylor, 2002 e Kisner, 1996) atestam que a condição de anel primário com rotação variável, somente, é a mais vantajosa atualmente no mercado. De fato, isso foi verificado, e essa estratégia apresentou redução da ordem de 1,5% em relação ao sistema de referência. As outras alternativas com acionamentos primário constante e secundário variável, e vice-versa, apresentaram consumos superiores à referência em 0,5% e 2,0%, respectivamente.

Além disso, foi mostrado que a localização do edifício tem papel fundamental em seu consumo anual. Esse fato foi avaliado com simulações do mesmo modelo em Salvador e no Rio de Janeiro. Essas cidades pertencem à zona climática 1, e portanto apresentam outros requisitos construtivos. Com o clima mais quente, o consumo do sistema de climatização é muito superior nessas cidades. Sendo assim, o edifício no Rio de Janeiro apresentou um consumo 23% superior ao de São Paulo, e Salvador, 35%.

Verificou-se que a configuração com anel primário com rotação variável sem secundário é a solução com menor consumo de energia elétrica para as três cidades. Além disso,

observa-se que as demais configurações promovem níveis de consumo de energia elétrica maiores para as cidades do Rio de Janeiro e Salvador, em relação aos níveis atingidos na cidade de São Paulo

Por fim, foi realizada uma breve análise econômica da estratégia de circulação de água gelada de referência, considerando sua substituição pela opção de menor consumo. A análise mostrou que a economia em números absolutos foi muito expressiva, e os investimentos são neutralizados já no primeiro ano. A redução na conta de luz foi de 1,8% no ano de número um, e de 1,7% considerando vida útil dos equipamentos de 10 anos.

Em uma análise mais ampla, o projeto permitiu o contato com um tema muito atual, e que vem ganhando ainda mais importância nos últimos tempos. Muito mais do que a questão financeira, o tema da sustentabilidade e da conservação do meio ambiente vêm sendo bastante explorados. A melhor utilização dos recursos da natureza deixa o homem cada vez menos dependente de fontes de energia mais poluentes, o que certamente traz benefícios à sociedade. Assim, é fundamental criar projetos preocupados com o meio ambiente, como é o caso da construção de edifícios sustentáveis.

Nessa linha, é de grande valor a existência de normas reguladoras no setor de construção civil. Naturalmente essas iniciativas são muito mais avançadas em países desenvolvidos, mas felizmente observa-se a crescente participação do Brasil nesse cenário, e trabalhos como este têm por objetivo também a divulgação dessa tendência, mostrando à sociedade mais essa forma para contribuir para a melhoria da qualidade de vida.

Finalmente, embora os ganhos observados (em termos de consumo energético) entre as diferentes estratégias de climatização para o exemplo estudado neste trabalho tenham sido pequenos (inferiores a 4% no melhor caso), já são suficientes para gerar interesse, e chamam a atenção pelo rápido retorno do investimento obtido. Dessa forma, o trabalho também teve como objetivo incentivar o estudo do tema, eventualmente considerando diferentes possibilidades não avaliadas aqui.

Houve indícios de que sistemas de climatização com vazão variável em ambos os anéis de refrigeração poderiam gerar resultados ainda mais vantajosos. Esses indícios colocam como sugestão de continuação deste trabalho a possibilidade de estudo comparativo de todos os regimes possíveis de vazão entre primário e secundário. Isso demandaria trabalho, inclusive de programação, para adicionar algumas condições ao software Energy Plus, mas que certamente valeriam a pena para um estudo mais completo.

Outra forma de sofisticar as análises iniciadas aqui é através da atuação sobre estratégias de controle do sistema. Nesse caso poder-se-ia explorar parâmetros de controle utilizados no software Energy Plus. Há publicações (Gao et al 2011 e Ma&Wang 2008) que tratam desse tema, e resultados bastante expressivos têm sido obtidos no que se refere à melhoria da eficiência de sistemas como os estudados neste trabalho.

Uma outra possibilidade é o estudo integrado de diferentes estratégias de melhoria do consumo, partindo de um estudo como o desenvolvido neste relatório, como por exemplo o uso conjunto de economizadores ou de vigas frias. A princípio essas combinações trariam benefícios maiores, mas seria conveniente quantificar a vantagem e verificar sua viabilidade. Além disso certamente as estratégias são mais ou menos eficazes de acordo com o clima da cidade em estudo, fato que poderia ser incluído na análise.

Enfim, trata-se de um tema amplo, abrangente, e com muitas vertentes passíveis de observação. Em virtude de sua atualidade, importância e interesse crescente, muitas publicações vêm sendo produzidas, o que serve como incentivo e fonte de estudo e pesquisa para estudantes que venham a se interessar.

ANEXO

Tabela A.1. Calor gerado por pessoas em diferentes atividades (ASHRAE 90.1).

Nível de atividade	Local	Calor total (W)		Calor sensível (W)	Calor latente (W)	% Radiante do calor sensível	
		Homem adulto	Ajustado M/F			Baixa velocidade do ar	Alta velocidade do ar
Sentado no teatro	Teatro matinê	115	95	65	30		
Sentado no teatro, noite	Teatro noite	115	105	70	35	60	27
Sentado, trabalho leve	Escritórios, hotéis, apartamentos	130	115	70	45		
Atividade moderada em trabalhos de escritório	Escritórios, hotéis, apartamentos	140	130	75	55		
Parado em pé, trabalho moderado; caminhando	Loja de varejo ou de departamantos	160	130	75	55	58	38
Caminhando, parado em pé	Farmácia, agência bancária	160	145	75	70		
Trabalho sedentário	restaurante	145	160	80	80		
Trabalho leve em bancada	Fábrica	235	220	80	140		
Dançando moderadamente	Salão de baile	265	250	90	160	49	35
Caminhando 4,8 km/h; trabalho leve em máquina operatriz	Fábrica	295	295	110	185		
Jogando boliche	Boliche	440	425	170	255		
Trabalho pesado	Fábrica	440	425	170	255	54	19
Trabalho pesado em máquina operatriz; carregando carga	Fábrica	470	470	185	285		
Praticando esportes	Ginásio, academia	585	525	210	315		

Tabela A.2. Densidade de carga de escritórios (retirada da NBR 16401-1/2008).

Densidade típica de carga de equipamentos para diversos tipos de escritórios		
Tipo de carga	Densidade W/m^2	Descrição do escritório Assumindo:
Leve	5,4	15,5 m^2 por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.
Média	10,7	11,6 m^2 por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.
Média/Alta	16,2	9,3 m^2 por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.
Alta	21,5	7,7 m^2 por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras.

Tabela A.3. Perfis de uso de um edifício de escritório (retirada da ASHRAE 90.1).

Números representam porcentagem da capacidade máxima	Perfil de ocupação			Perfil de iluminação			Perfil do sistema de HVAC			Perfil do serviço de água quente			Perfil do serviço do elevador		
Tempo	Sem	Sáb	Dom	Sem	Sáb	Dom	Sem	Sáb	Dom	Sem	Sáb	Dom	Sem	Sáb	Dom
1 (12-1 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
2 (1-2 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
3 (2-3 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
4 (3-4 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
5 (4-5 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
6 (5-6 am)	0	0	0	10	5	5	Off	Off	Off	8	8	7	0	0	0
7 (6-7 am)	10	10	5	10	10	5	On	On	Off	7	7	4	0	0	0
8 (7-8 am)	20	10	5	30	10	5	On	On	Off	19	11	4	35	16	0
9 (8-9 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off	35	15	4	69	14	0
10 (9-10 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off	38	21	4	43	21	0
11 (10-11 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off	39	19	4	37	18	0
12 (11-12 pm)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off	47	23	6	43	25	0
13 (12-1 pm)	50	10	5	80	15	5	On	On	Off	57	20	6	58	21	0
14 (1-2 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off	54	19	9	48	13	0
15 (2-3 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off	34	15	6	37	8	0
16 (3-4 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off	33	12	4	37	4	0
17 (4-5 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off	44	14	4	46	5	0
18 (5-6 pm)	30	5	5	50	5	5	On	On	Off	26	7	4	62	6	0
19 (6-7 pm)	10	5	0	30	5	5	On	Off	Off	21	7	4	20	0	0
20 (7-8 pm)	10	0	0	30	5	5	On	Off	Off	15	7	4	12	0	0
21 (8-9 pm)	10	0	0	20	5	5	On	Off	Off	17	7	4	4	0	0
22 (9-10 pm)	10	0	0	20	5	5	On	Off	Off	8	9	7	4	0	0
23 (10-11 pm)	5	0	0	10	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0
24 (11-12 am)	5	0	0	5	5	5	Off	Off	Off	5	5	4	0	0	0

Tabela A.4. Simulações.

	vazão no primário	vazão no secundário	tipo de carga	ocupação m^2/pessoa	equipamentos W/m^2	iluminação W/m^2
variação #01	variável	N/A	média/alta	9,3	16,2	12
referência	constante	N/A	média/alta	9,3	16,2	12
variação #02	constante	variável	média/alta	9,3	16,2	12
variação #03	variável	constante	média/alta	9,3	16,2	12
variação #04	variável	N/A	média/alta	9,3	16,2	9,6
variação #05	constante	N/A	média/alta	9,3	16,2	9,6
variação #06	constante	variável	média/alta	9,3	16,2	9,6
variação #07	variável	constante	média/alta	9,3	16,2	9,6
variação #08	variável	N/A	média/alta	9,3	16,2	14,4
variação #09	constante	N/A	média/alta	9,3	16,2	14,4
variação #10	constante	variável	média/alta	9,3	16,2	14,4
variação #11	variável	constante	média/alta	9,3	16,2	14,4
variação #12	variável	N/A	leve	15,5	5,4	12
variação #13	constante	N/A	leve	15,5	5,4	12
variação #14	constante	variável	leve	15,5	5,4	12
variação #15	variável	constante	leve	15,5	5,4	12
variação #16	variável	N/A	leve	15,5	5,4	9,6
variação #17	constante	N/A	leve	15,5	5,4	9,6
variação #18	constante	variável	leve	15,5	5,4	9,6
variação #19	variável	constante	leve	15,5	5,4	9,6
variação #20	variável	N/A	leve	15,5	5,4	14,4
variação #21	constante	N/A	leve	15,5	5,4	14,4
variação #22	constante	variável	leve	15,5	5,4	14,4
variação #23	variável	constante	leve	15,5	5,4	14,4
variação #24	variável	N/A	média	11,6	10,7	12
variação #25	constante	N/A	média	11,6	10,7	12
variação #26	constante	variável	média	11,6	10,7	12
variação #27	variável	constante	média	11,6	10,7	12
variação #28	variável	N/A	média	11,6	10,7	9,6
variação #29	constante	N/A	média	11,6	10,7	9,6
variação #30	constante	variável	média	11,6	10,7	9,6
variação #31	variável	constante	média	11,6	10,7	9,6
variação #32	variável	N/A	média	11,6	10,7	14,4
variação #33	constante	N/A	média	11,6	10,7	14,4
variação #34	constante	variável	média	11,6	10,7	14,4
variação #35	variável	constante	média	11,6	10,7	14,4
variação #36	variável	N/A	alta	7,7	21,5	12
variação #37	constante	N/A	alta	7,7	21,5	12
variação #38	constante	variável	alta	7,7	21,5	12
variação #39	variável	constante	alta	7,7	21,5	12
variação #40	variável	N/A	alta	7,7	21,5	9,6
variação #41	constante	N/A	alta	7,7	21,5	9,6
variação #42	constante	variável	alta	7,7	21,5	9,6
variação #43	variável	constante	alta	7,7	21,5	9,6
variação #44	variável	N/A	alta	7,7	21,5	14,4
variação #45	constante	N/A	alta	7,7	21,5	14,4
variação #46	constante	variável	alta	7,7	21,5	14,4
variação #47	variável	constante	alta	7,7	21,5	14,4

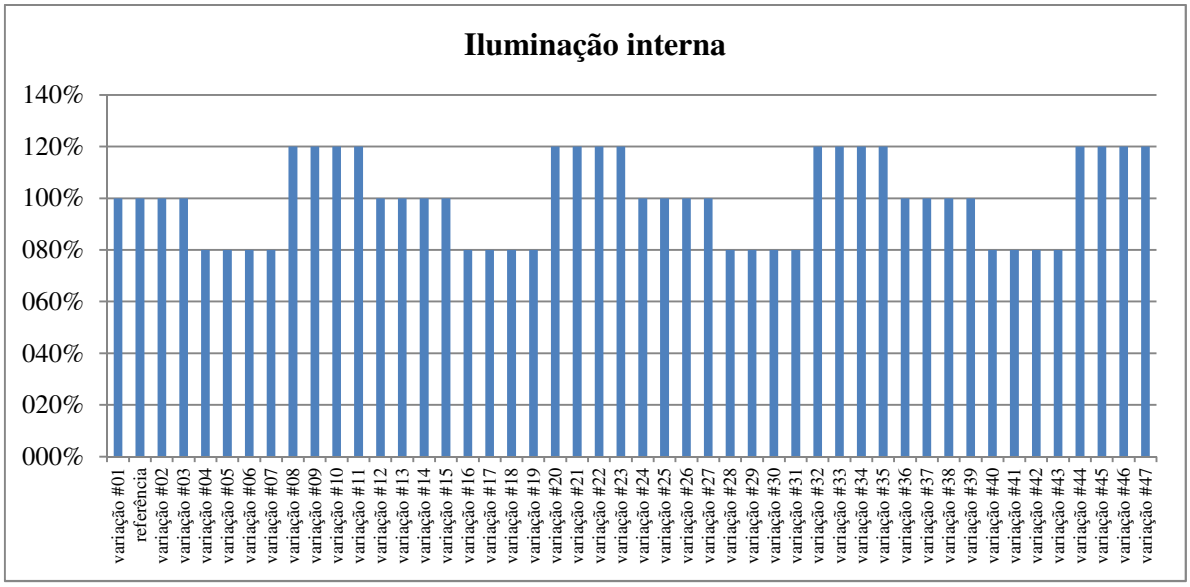

Figura A.1. Intensidade de iluminação (referência = 12 W/m^2).

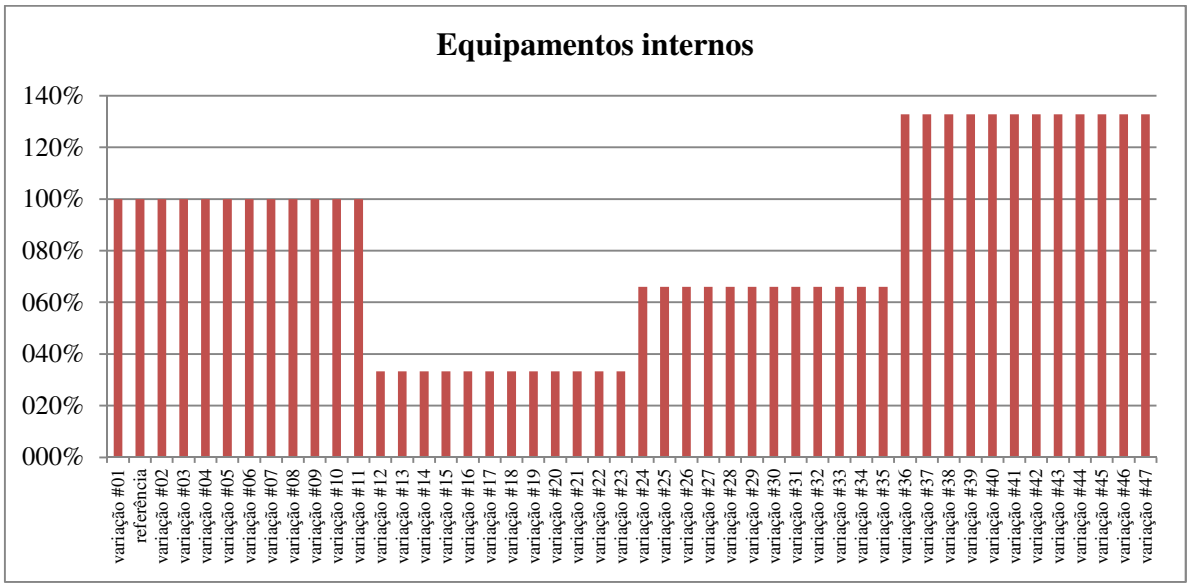

Figura A.2. Intensidade de equipamentos (referência = 16,2 W/m^2).

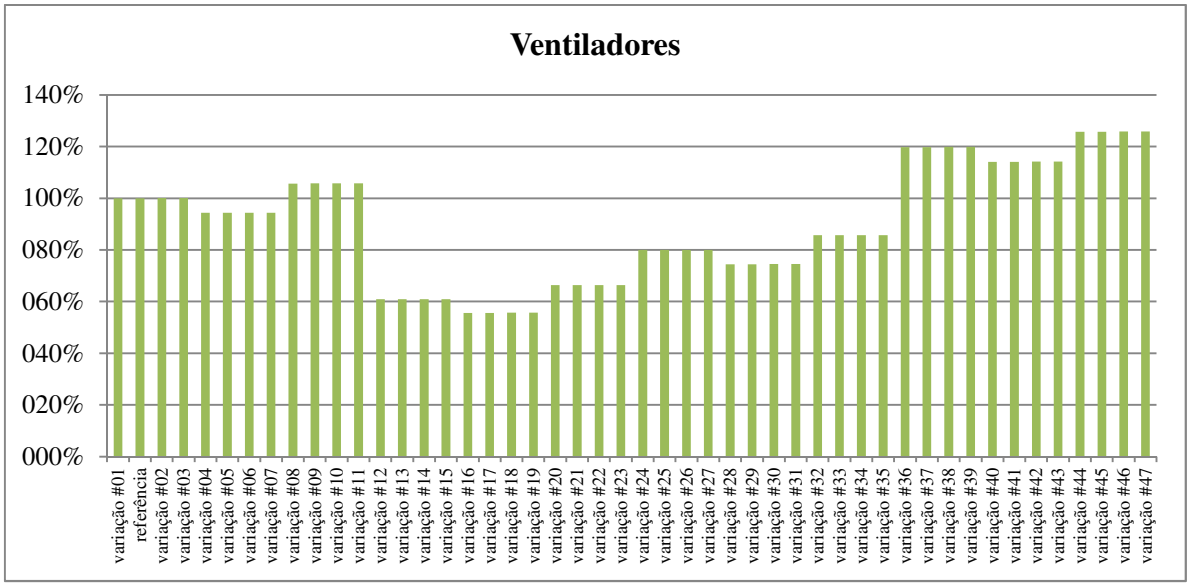

Figura A.3. Consumo de energia por ventiladores (referência = 127 MWh – anual).

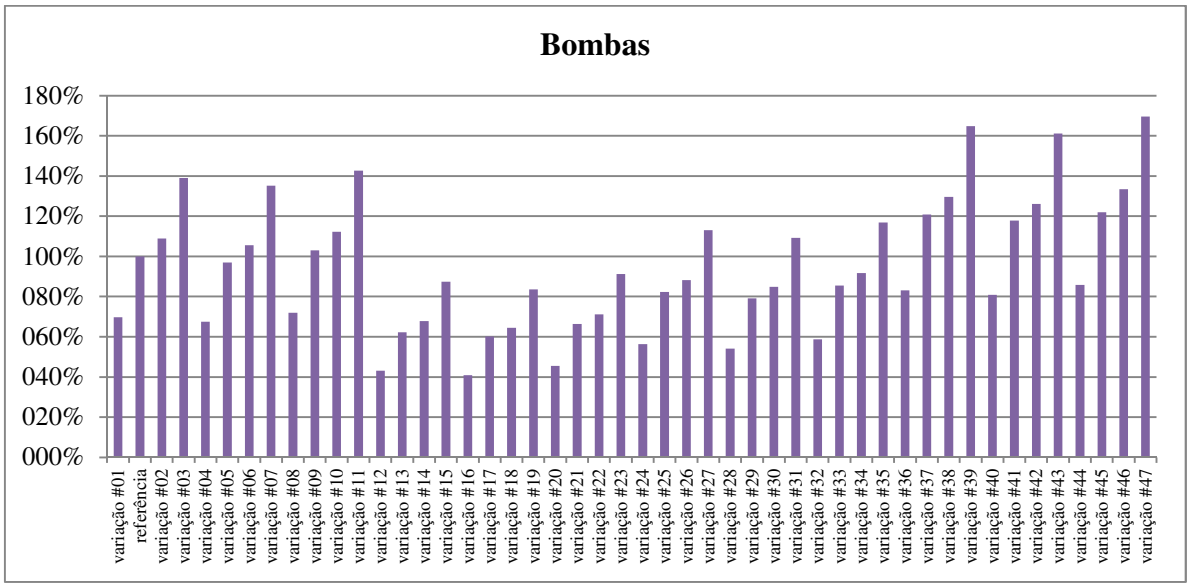

Figura A.4. Consumo de energia por bombas (referência = 94 MWh – anual).

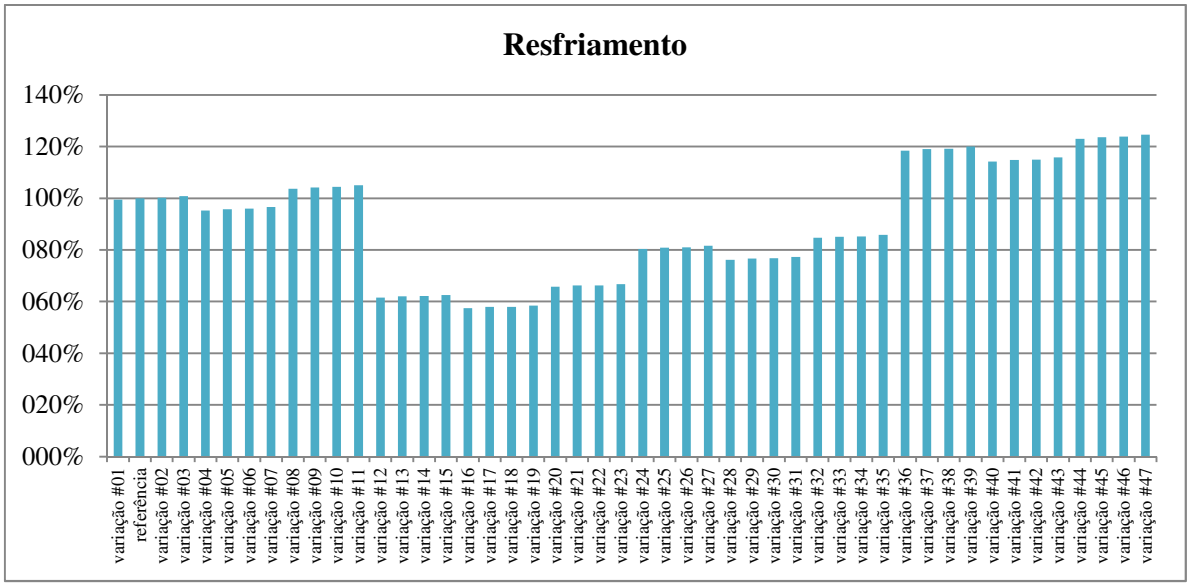

Figura A.5. Consumo de energia por resfriamento (referência = 1 GWh – anual).

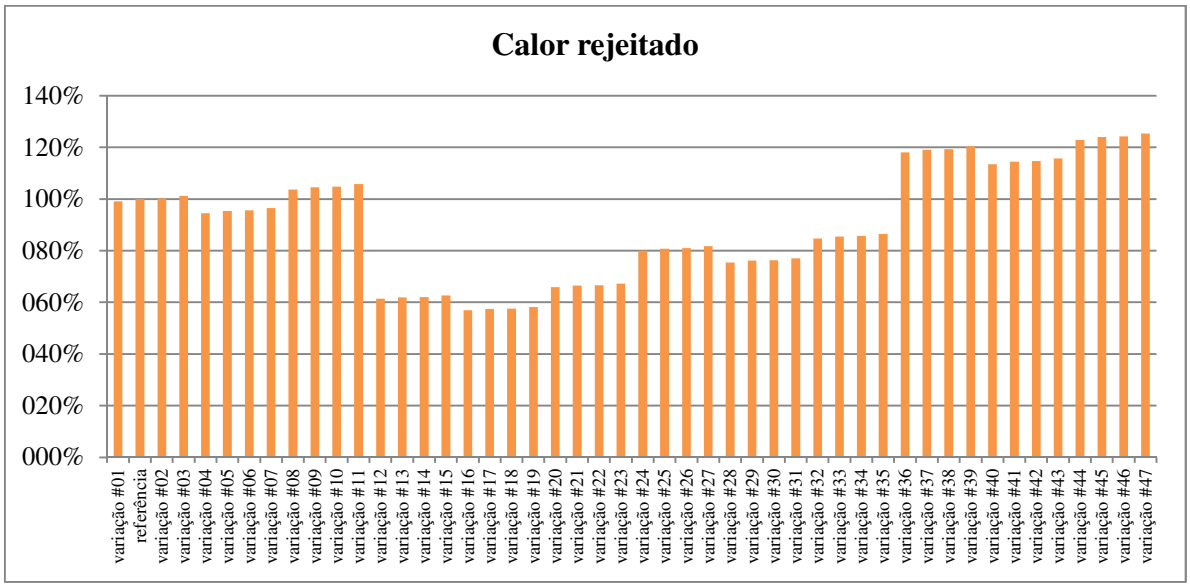

Figura A.6. Calor rejeitado ao meio externo (referência = 24 MWh – anual).

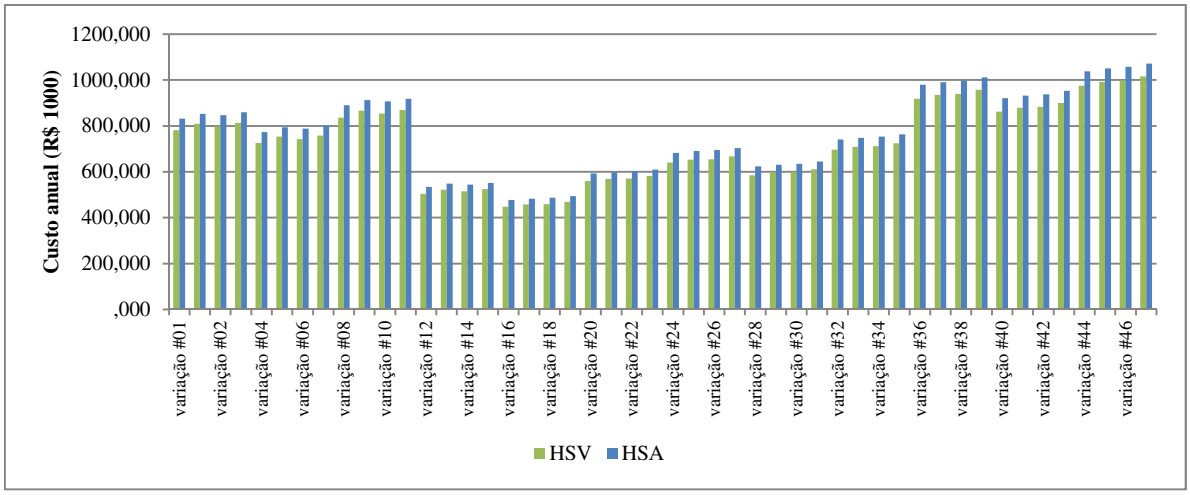

Figura A.7. Gastos anuais com energia do edifício (tarifas horo-sazonais verde e azul).

LISTA DE REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Standard 90.1**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. I-P edition. 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos de instalações. Rio de Janeiro, 2008.

CAVALCANTE, R. C. D. **Simulação energética para análise de arquitetura de edifícios de escritório além da comprovação de conformidade com códigos de desempenho**. 2010. 135 p. Dissertação Mestrado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo., Universidade de São Paulo, São Paulo.

EHRLICH, P. J. **Engenharia econômica**: avaliação e seleção de projetos de investimento. 5. Ed. São Paulo: Atlas.

FIESP. Manual de Tarifação. São Paulo. Disponível em <http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/energia/Manual_de_Tarifacao.pdf>. Acesso: 14 nov. 2011.

GAO, D.; WANG, S.; SUN, Y. A fault-tolerant and energy efficient control strategy for primary–secondary chilled water systems in buildings. **Elsevier Journal of Energy and Buildings**. v. 43, n. 12, p. 3646-3656, 2011.

KAPLAN, M.; CANER, P. **Guidelines for energy simulation of commercial buildings**. 1. ed., Portland: 1992. 126 p.

KIRSNER, W. The Demise of the Primary-Secondary Pumping Paradigm for Chilled Water Plant Design, **HPAC Engineering**, v. 68, n. 11, p. 73-78, 1996.

MA, Z.; WANG, S. Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning system. **Elsevier Journal of Energy and Buildings**. v. 41, n. 2, p. 197-205, 2008.

SÁ, R. A. Procura e Eficiência Energética III - O Caso Particular dos Edifícios, apresentação da Edifícios Saudáveis Consultores – Ambiente e Energia em Edifícios, Ltda., Porto, Portugal, 2005.

TAYLOR, S. T. Primary-Only vs. Primary-Secondary Variable Flow Systems. **ASHRAE Journal**, v. 44, n. 2, p. 25-29, 2002.