

WELDER BOENO DE SOUZA

COMPARAÇÃO ENTRE DOIS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO PARA UM  
PRÉDIO HISTÓRICO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Porto Alegre  
2010



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica**

**COMPARAÇÃO ENTRE DOIS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO PARA UM  
PRÉDIO HISTÓRICO**

**WELDER BOENO DE SOUZA**

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. Volnei Borges  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2010

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela oportunidade do dom da vida.

a minha família, pelo apoio e carinho e por sempre incentivaram meus estudos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer*, pela qualidade de ensino e pela disposição de sempre ter ajudado nos períodos críticos do trabalho

aos colegas e amigos da faculdade e da Casa do Estudante, pelo apoio nesses anos.

a minha namorada, Camila, pelo carinho e compreensão durante o período desse trabalho, a qual jamais esquecerei.

aos Engenheiros Mecânicos Carlos M. de Medeiros, Fábio Botega e Roger Carvalho, pela grande amizade e pelos conhecimentos transmitidos

ao Arq. Me. Rômulo Giralt pela contribuição dada nesse trabalho

“Viver é como andar de bicicleta: É preciso estar em constante movimento para manter o equilíbrio.”

*Albert Einstein*

BOENO, W. S. **Comparação entre Dois Sistemas de Ar-Condicionado para um Prédio Histórico**. 2010. 21f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## RESUMO

Em virtude das comparações existentes entre o sistema VRF (Vazão de Refrigerante Variável) e o Água Gelada, este trabalho busca avaliar a eficiência energética de ambos os sistemas, aplicados a um prédio histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre. Para esse estudo, utiliza-se a ferramenta computacional *EnergyPlus*. O modelo construído é desenvolvido no *Google Sketchup* juntamente com a ferramenta *Open Studio* e é modelado de forma a representar todas as zonas da edificação. Na avaliação do consumo energético de ambos os sistemas de ar-condicionado, são utilizadas variáveis obtidas através de catálogos de fabricantes e ajustando as curvas de desempenho das máquinas selecionadas, busca-se aproximar a simulação o mais próximo da realidade. Por fim, conclui-se que para esta aplicação e com as considerações feitas para cada sistema de ar-condicionado, o sistema VRF é o mais indicado para ser aplicado ao projeto de ar-condicionado da edificação, obtendo 22,4% menor consumo elétrico, comparado ao Água Gelada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, VRF, Água Gelada, *EnergyPlus*, Consumo elétrico.

BOENO, W. S. **Comparison between Two Systems of Air-Conditioned for a Historic Building**. 2010. 21f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

#### ABSTRACT

Given the comparisons between the VRF (Variable Refrigerant Flow) and chillers, this study aims at determining the energy efficiency of both systems applied to a historic building at the Federal University of Rio Grande do Sul in Porto Alegre. For this study, it is used the computational tool EnergyPlus. The constructed model is developed in *Google Sketchup* and *Open Studio*; besides it is modeled in order to represent all areas of the building. In the evaluation of energy consumption of both air conditioning systems, variables obtained from manufacturer catalogs are used. By adjusting the performance curves of the selected machines, there is an attempt to bring the simulation closer to reality. Finally, it possible to conclude that, for this application and the assumptions made for each air-conditioning system, VRF is the most suitable system to be applied to the design of air conditioning for the building, thus obtaining 22.4% lower power consumption compared to chilled water system.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, VRF, Chilled water, *EnergyPlus*, Electric Consumption.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>1</b>
<b>3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL .....</b>	<b>2</b>
3.1. <i>Google Sketchup</i> .....	2
3.2. <i>Open Studio</i> .....	2
3.3. <i>EnergyPlus</i> .....	2
3.4. Equações de Balanço de Energia.....	3
3.5. Arquivo Climático .....	3
3.6. Variáveis de Entrada.....	3
3.7. Variáveis de Saída .....	4
<b>4. SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO .....</b>	<b>4</b>
4.1. Sistema VRF.....	4
4.2. Sistema de Água Gelada .....	5
4.3. Expansão direta e indireta .....	5
4.4. Acoplamento dos sistemas de ar-condicionado ao.....	5
<i>EnergyPlus</i> .....	5
4.5. Correlações de desempenho para refrigeração e aquecimento do sistema VRF .....	5
4.5.1. Correlação de desempenho para refrigeração .....	5
4.5.2. Correlação de desempenho para aquecimento .....	6
4.6. Correção do desempenho da capacidade de aquecimento para o sistema de Água Gelada.....	6
<b>5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>7</b>
5.1. Edificação .....	7
5.1.1. Construções .....	7
5.1.2. Cargas Internas .....	8
5.1.2.1. Equipamentos .....	8
5.1.2.2. Pessoas.....	8
5.1.2.3. Iluminação .....	8
5.1.2.4. Infiltração.....	8

5.1.3. Cronograma de Utilização do Prédio (Schedules).....	8
<b>6. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>8</b>
6.1. Dimensionamento do Sistema VRF.....	9
6.2. Dimensionamento do sistema de Água Gelada .....	10
6.3. Consumo elétrico .....	11
6.3.1. Consumo Elétrico com o Sistema VRF .....	11
6.3.2. Consumo Elétrico com o Sistema Água Gelada.....	12
6.4. Comparação do Consumo Elétrico entre os Sistemas de Ar-Condicionado.....	13
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>15</b>
<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>16</b>
<b>APÊNDICE A – DIVISÃO DAS ZONAS PARA SIMULAÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>APÊNDICE B – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS. ....</b>	<b>18</b>
<b>APÊNDICE C – CARGAS INTERNAS .....</b>	<b>19</b>
<b>APÊNDICE D – ROTINA DE SIMULAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO .....</b>	<b>19</b>
<b>APÊNDICE E – TABELA DE SELEÇÃO DAS UNIDADES <i>FANCOIL</i>.....</b>	<b>20</b>
<b>APÊNDICE F – CONJUNTO MOTO-VENTILADOR .....</b>	<b>20</b>
<b>APÊNDICE G – COMPARAÇÃO INDIVIDUAL ENTRE COMPONENTES DOS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO .....</b>	<b>21</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Desde o aparecimento do sistema VRF (Vazão de Refrigerante Variável) no mercado de ar-condicionado, uma comparação com o sistema de Água Gelada foi inevitavelmente feita.

Por se tratar de sistemas com a mesma aplicabilidade, o mercado não se posiciona claramente entre VRF e Água Gelada. O segundo já consolidado no mercado e com vários anos de aplicação, foi confrontado com um sistema mais novo, surgindo assim várias questões como, por exemplo, qual sistema teria uma melhor eficiência, qual apresentaria uma melhor viabilidade econômica, se ambos poderiam apresentar as mesmas condições de conforto, entre outras.

Motivado por essas questões, esse trabalho realizará a comparação entre esses dois sistemas, aplicados em um prédio histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. As configurações utilizadas, para os sistemas de ar-condicionado, baseiam-se em métodos mais comumente aplicados, utilizando-se assim o sistema de Água Gelada configurado com um circuito primário, atendendo toda a edificação e o sistema VRF dividido por orientação das fachadas do prédio. A configuração adotada para o sistema de Água gelada baseia-se nas limitações encontradas para os prédios da universidade, onde não é possível utilizar uma instalação mais complexa, por exemplo, com termo-acumulação e com mais de um circuito para o sistema. Isso ocorre principalmente pela falta de mão de obra disponível para manutenção e operação nessas condições. Essa comparação será feita através de uma análise energética entre esses sistemas. Assim, se espera através da análise dos dados obtidos com as simulações esclarecer as questões apresentadas e sugerir qual o melhor sistema para ser aplicado ao prédio.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Carotenuto (2009) realizou a análise de um prédio histórico de elevada inércia térmica localizado na UFRGS, em Porto Alegre. Ele dimensionou o sistema de ar-condicionado realizando simulações em dias de projeto no programa Energy Plus. Realizadas as simulações, ele optou em utilizar o sistema de ar-condicionado VRF e assim avaliar o consumo energético da edificação com esse sistema, julgando ser mais eficiente.

Para a declaração do sistema de ar-condicionado no programa, utilizou dados de catálogos de fabricantes como potencia de refrigeração, vazão de ar, fator de calor sensível e potência dos ventiladores, todos eles usados para o dimensionamento das unidades evaporadoras (unidades internas). Nas unidades condensadoras (unidades externas) foram levados em conta os dados do COP (coeficiente de desempenho) de cada máquina e ajustados com as correlações de desempenho para essas unidades.

Verificou-se que os maiores responsáveis pelo consumo de energia elétrica do prédio são os equipamentos, seguidos da iluminação interna e do sistema de ar-condicionado.

Basile (2009), com o artigo “VRF e Água Gelada: Eficiência está no projeto”, propôs um questionamento sobre qual sistema possuiria uma melhor eficiência energética. Ela salientou que esta eficiência varia de acordo com o tipo de instalação, um projeto bem especificado e boas práticas de engenharia. Na questão dos consumo de energia informou que é difícil afirmar com segurança qual teria um menor consumo energético sem a utilização de *softwares* para simulação de desempenho em edifícios.

De acordo com o artigo os principais limites de um sistema tipo VRF são o atendimento as cargas de calor sensível e latente na maioria das aplicações, a taxa de renovação de ar que necessita de um sistema para renovar o ar para os terminais ou para os ambientes, a limitação dos desníveis e as distâncias. Quanto maior forem os desníveis e as distâncias, menor será a

sua eficiência energética. Na especificação de um projeto evita-se indicar sistemas de VRF para instalações acima de 1.000TR (3.517 kW) em virtude da quantidade de equipamentos, pois no futuro pesará na manutenção. Um ponto importante é o menor consumo nas unidades internas com um motor de corrente contínua quando comparados aos de corrente alternada dos sistemas de água gelada. Uma das maiores causas do consumo excessivo dos sistemas de Água Gelada existentes é a falta de operação otimizada. Para o sistema de VRF salienta-se a carga de fluido refrigerante de R-410A que é muito alta e em caso de vazamento é cerca de 3,5 vezes maior que comparado ao sistema de água gelada.

Verifica-se assim, que ambos os sistemas são competitivos entre si, que cada um possui suas limitações e benefícios e que como citado no artigo não é seguro afirmar sem a utilização de um *software* para simulação de desempenho em edifícios, qual sistema teria uma melhor eficiência energética.

### 3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para a comparação desses dois sistemas, foi criado um modelo computacional utilizando-se o programa *EnergyPlus*. Na primeira etapa esse modelo foi desenvolvido no programa *Google Sketchup*, através do plugin *Open Studio*, utilizado em conjunto com o *EnergyPlus*.

#### 3.1. GOOGLE SKETCHUP

É um programa de modelagem 3D para ambientes de arquitetura, engenharia civil, engenharia mecânica, entre outros. Originalmente desenvolvido pela *At Last Software*, esta ferramenta permite a construção rápida de modelos arquitetônicos. Através de sua interface simples, o programa possibilita uma rápida modelagem do sistema.

#### 3.2. OPEN STUDIO

Criado pela *National Renewable Energy Laboratory*, do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o *Open Studio* é um plugin que permite a utilização das ferramentas padrões do *Google Sketchup* para a criação e edição de zonas e superfícies utilizadas pelo *EnergyPlus*. Ele permite a exploração dos arquivos de entrada do *EnergyPlus*, utilizando todos os recursos 3D nativos do *Google Sketchup*, possibilitando a visão da geometria de qualquer ponto de vista, aplicação de diferentes tipos de renderização e avaliação dos efeitos de sombreamento. O *Open Studio* é uma ferramenta disponível gratuitamente na página do DOE na internet e está atualmente na versão 1.0.6.

#### 3.3. ENERGYPLUS

Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o *EnergyPlus* é um programa de análise térmica e energética de edificações. É um *software* livre, atualmente na versão 6.0.0, disponível na página do DOE na internet.

Essa ferramenta permite avaliar o comportamento termo-energético de uma edificação através de parâmetros como, insolação, fator de sombra, temperatura dos ambientes, umidade relativa, fluxo de calor através das superfícies da edificação, carga térmica devido à ocupação e a equipamentos além de permitir a utilização de diferentes sistemas de ar-condicionado. Além disso, ele possibilita uma avaliação mensal e anual do consumo energético da edificação, apresentando individualmente os valores parciais de todos os sistemas envolvidos no prédio, tal como ar-condicionado, iluminação e equipamentos.

### 3.4. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA

A base de cálculo utilizada pelo *EnergyPlus* para o balanço de calor da zona é a resolução da seguinte equação diferencial ordinária:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_\infty - T_z) + \dot{m}_{sis} c_p (T_{sup} - T_z) \quad (1)$$

onde  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a taxa de energia acumulada na zona térmica,  $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$  é o somatório das cargas internas do ambiente,  $\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a taxa de calor devido à convecção através das superfícies da zona térmica,  $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$  é o somatório das taxas de calor provenientes das outras zonas,  $\dot{m}_{inf} c_p (T_\infty - T_z)$  é a taxa de calor proveniente da infiltração de ar externo na zona e  $\dot{m}_{sis} c_p (T_{sup} - T_z)$  é a taxa de calor fornecida pelo sistema de ar-condicionado à zona, todos em W.

### 3.5. ARQUIVO CLIMÁTICO

O arquivo climático utilizado no *EnergyPlus* e por programas de simulação de energia foi desenvolvido baseando-se na necessidade de dados climáticos inferiores a uma hora. O formato utilizado inclui um campo de minuto a minuto. Esses dados possuem indicadores de localização como nome, fonte de dados, latitude, longitude, fuso-horário, altitude, condições de pico para projeto, período de verão, temperaturas do solo. Incluem também, temperatura de bulbo seco e de orvalho, umidade relativa, radiação solar (global, difusa, direta, infravermelha), iluminação, direção e velocidade do vento.

A montagem estatística desses dados é realizada pelo método *TMY (Test Meteorological year)*. Na formação desse arquivo são selecionados os meses mais expressivos que ocorreram no período medido, resultando em um ano formado por meses de anos diferentes.

O arquivo climático para cidade de Porto Alegre utilizado nesse trabalho foi obtido através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LABEEE (2010). Esse arquivo possui o formato *EPW (EnergyPlus Weather)*, formato utilizado pelo *EnergyPlus*.

A evolução da temperatura de bulbo seco de Porto Alegre ao longo do ano, com a curva de tendência, pode ser vista na figura 1.

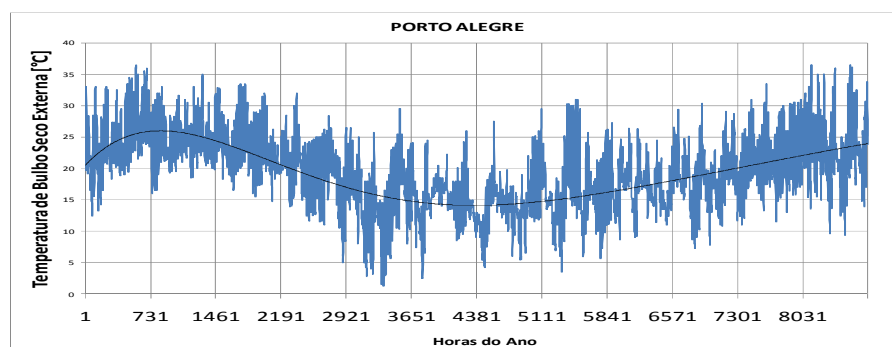


Figura 1 – Evolução anual da temperatura de Bulbo Seco externa para Porto Alegre

### 3.6. VARIÁVEIS DE ENTRADA

A primeira etapa do desenvolvimento do modelo ocorre no *Google Sketchup* juntamente com o plugin *Open Studio*. Nesta fase cria-se toda a envoltória da edificação como paredes,

forros, pisos, janelas, portas, ou seja, todas as superfícies que constituem a edificação são criadas com essas ferramentas.

Para fins de simulação, o prédio é dividido em “zonas”, sendo que cada zona criada corresponde a um ambiente diferente. Esse zoneamento favorece para uma simulação mais confiável, pois cada ambiente ou zona possui diferentes características.

Após o desenvolvimento do modelo arquitetônico são declarados os materiais que constituem a edificação. Essa etapa ocorre no *EnergyPlus*, onde se especificam as características de cada superfície, como espessura, densidade, condutividade térmica e calor específico. Por fim, declaram-se os ganhos de calor interno que são constituídos por pessoas, equipamentos, iluminação e infiltrações.

### 3.7. VARIÁVEIS DE SAÍDA

O *EnergyPlus* pode gerar diversos tipos de arquivos e variáveis de saída. Esses arquivos contêm as informações obtidas através das simulações realizadas com o modelo descrito. Porém cabe ao usuário escolher a série de variáveis e relatórios que serão gerados pelo programa. Esta seleção poder variar de simulação para simulação, fazendo com que o usuário tenha flexibilidade para escolher os dados necessários para sua análise.

Para este trabalho, solicitaram-se primeiramente as variáveis necessárias para o dimensionamento das máquinas de ar-condicionado. Tanto para VRF e Água Gelada, os dados escolhidos foram: potência de refrigeração, vazão de ar, calor sensível, temperatura e potência de aquecimento. Com essa seleção o programa gerou uma planilha com o valor individual de cada zona.

Além dos dados fornecidos para seleção de equipamentos o programa também fornece relatórios de consumo energético. Nas simulações feitas solicitaram-se os seguintes relatórios: consumo elétrico do ar-condicionado, o qual envolve refrigeração, aquecimento e potência dos ventiladores, consumo elétrico dos equipamentos e iluminação interna. Esses dados foram selecionados para ambos os sistemas. Para o sistema de Água gelada foi fornecido também o consumo elétrico das bombas. Todos os dados gerados pelo programa foram apresentados com consumos mensais de energia.

## 4. SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO

Foram utilizados nesse trabalho os sistemas de VRF e Água gelada. Eles foram escolhidos devido à semelhança de suas aplicações, possibilitando assim a comparação entre ambos. Para o sistema VRF foram utilizados os manuais técnicos do fabricante Daikin (2006) e para a Água gelada os manuais técnicos do modelo *Aquasnap* da Carrier (2006).

### 4.1. SISTEMA VRF

O VRF é classificado como um sistema central em que o conjunto de unidades de tratamento de ar de expansão direta, geralmente instaladas dentro do ambiente a que servem (designadas unidades internas), cada uma operada e controlada independentemente das demais, é suprido em fluido refrigerante líquido em vazão variável (VRF) por uma unidade condensadora central, instalada externamente (designada unidade externa), (ABNT, 2008).

Esse sistema é comparado ao *Split* convencional, pois ambos possuem expansão direta e contam com unidade condensadora e evaporadora. Porém são sistemas que possuem limitações bem diferentes. Enquanto o VRF pode possuir várias unidades evaporadoras conectadas a uma condensadora, o *Split* trabalha apenas na relação 1 para 1, ou seja uma condensadora para uma evaporadora.

## 4.2. SISTEMA DE ÁGUA GELADA

O sistema consiste em uma central onde uma ou mais unidades de tratamento de ar de expansão indireta, cada um operada e controlada independentemente das demais, são supridas com água gelada (ou outro fluido térmico) produzida numa central frigorígena constituída por um ou mais grupos resfriadores de água e distribuída por bombas, em circuito fechado, (ABNT, 2008).

## 4.3. EXPANSÃO DIRETA E INDIRETA

Sistemas com expansão direta são aqueles em que o próprio fluido refrigerante realiza a troca de calor com o ambiente, ao contrário dos sistemas com expansão indireta, no qual o fluido refrigerante troca calor com outro fluido (normalmente água) e esse trocará calor com o ambiente.

## 4.4. ACOPLAMENTO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO AO ENERGYPLUS

O programa ainda não disponibiliza um módulo que represente o sistema de VRF, pois as equações contidas no *EnergyPlus* não permitem que o sistema opere em regime parcial de potência de refrigeração e aquecimento com vazão de fluido refrigerante variável.

Tendo como referência Carvalho (2009) e Carotenuto (2009), utiliza-se do módulo do *EnergyPlus* com sistema de ar-condicionado com ciclo reverso e serpentina de expansão direta (*Unitary air-to-air heat pump system with DX expansion*), corrigindo assim as correlações de desempenho das unidades condensadoras para se adaptar ao sistema VRF.

Para a Água Gelada o *EnergyPlus* disponibiliza módulos onde se pode acoplar o sistema de ar-condicionado ao programa, sem a necessidade de tomar como referência outro modelo. Porém não se tem a possibilidade de utilizar o sistema em modo “Ciclo Reverso”, sendo assim necessária a utilização de um sistema de aquecimento separado. No presente trabalho utilizou-se o modelo de Água Gelada em ciclo reverso, realizando-se assim as correções para o desempenho da capacidade de aquecimento. Essas correções estão descritas no item 4.6.

## 4.5. CORRELAÇÕES DE DESEMPENHO PARA REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO DO SISTEMA VRF

O *EnergyPlus* apresenta em seu manual cinco correlações de desempenho para as variações de capacidade de refrigeração e aquecimento e para a eficiência do aparelho de ar-condicionado. Para a adequação do sistema VRF ao programa, optou-se em utilizar as correlações de desempenho de capacidade e desempenho da potência elétrica para refrigeração e aquecimento, todas elas funções da temperatura.

### 4.5.1. Correlação de desempenho para refrigeração

A correlação de desempenho para capacidade de refrigeração é apresentada através de uma correlação biquadrática que é função da temperatura de bulbo seco externa e da temperatura de bulbo úmido interna. Essa correlação é descrita da seguinte forma:

$$F_{CR} = a + b(Tbu_{int}) + c(Tbu_{int})^2 + d(Tbs_{ext}) + e(Tbs_{ext})^2 + f(Tbu_{int})(Tbs_{ext}) \quad (2)$$

onde  $F_{CR}$  corresponde ao fator de correção da capacidade de refrigeração,  $Tbu_{int}$  é a temperatura de bulbo úmido interna do ar e  $Tbs_{ext}$  é a temperatura de bulbo seco externa do ar.

Através de uma regressão polinomial por mínimos quadrados e utilizando-se as tabelas de desempenho da capacidade de refrigeração das unidades condensadoras, disponíveis no manual técnico do equipamento, são obtidos os valores dos coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$ .

A correlação de desempenho de potência de refrigeração é biquadrática e é função da temperatura de bulbo seco externa e da temperatura de bulbo úmido interna. Ela apresenta a seguinte forma:

$$F_{ER} = a + b(Tbu_{int}) + c(Tbu_{int})^2 + d(Tbs_{ext}) + e(Tbs_{ext})^2 + f(Tbu_{int})(Tbs_{ext}) \quad (3)$$

onde  $F_{ER}$  é ao fator de correção da potência elétrica de refrigeração.  $Tbu_{int}$  é a temperatura de bulbo úmido interna do ar,  $Tbs_{ext}$  é a temperatura de bulbo seco externa do ar e  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ , e  $f$  são os coeficientes da correlação biquadrática, que são obtidos através da regressão polinomial por mínimos quadrados, utilizando as tabelas de desempenho da capacidade de refrigeração da unidade condensadora, contidas no manual do fabricante.

#### 4.5.2. Correlação de desempenho para aquecimento

A capacidade de aquecimento apresenta uma correlação na forma cúbica, que é função da temperatura de bulbo seco do ar externo. Essa correlação apresenta a seguinte forma:

$$F_{CA} = a + b(Tbs_{ext}) + c(Tbs_{ext})^2 + d(Tbs_{ext})^3 \quad (4)$$

onde  $F_{CA}$  é o fator de correção da capacidade de aquecimento,  $Tbs_{ext}$  é a temperatura de bulbo seco do ar exterior,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são os coeficientes da correlação cúbica, sendo obtidos através da regressão polinomial, utilizando as tabelas de desempenho da capacidade de aquecimento da unidade condensadora, fornecidas no manual do fabricante.

A correlação de desempenho da potência elétrica de aquecimento apresenta uma forma cúbica em função da temperatura de bulbo seco externa. Ela é descrita como segue:

$$F_{EA} = a + b(Tbs_{ext}) + c(Tbs_{ext})^2 + d(Tbs_{ext})^3 \quad (5)$$

onde  $F_{EA}$  é o fator de correção da capacidade de aquecimento,  $Tbs_{ext}$  é a temperatura de bulbo seco do ar exterior, e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são os coeficientes da correlação cúbica, sendo obtidos através da regressão polinomial, utilizando as tabelas de desempenho da capacidade de aquecimento da unidade condensadora, fornecidas no manual do fabricante.

### 4.6. CORREÇÃO DO DESEMPENHO DA CAPACIDADE DE AQUECIMENTO PARA O SISTEMA DE ÁGUA GELADA

No presente trabalho utilizou-se o modelo de Ciclo Reverso para o sistema de Água Gelada. Esse modelo foi utilizado, pois os aparelhos do sistema VRF escolhidos possuem essa configuração.

O *EnergyPlus* não possibilita a utilização de Grupos Resfriadores (*Chillers*) em modo de ciclo reverso, sendo necessário o acoplamento de um sistema de aquecimento separado. Para tanto foi declarado no programa um Boiler elétrico, que realizará o aquecimento da água e fornecerá, quando solicitado, a carga de aquecimento ao sistema. Porém para realizar essa aproximação foi necessário corrigir o valor do consumo gerado pelo Boiler. Isso foi necessário, pois esse sistema de aquecimento elétrico atinge um COP de no máximo 1kW/kW.

Assim, a seguinte relação foi estabelecida:

$$\frac{E_{Boiler}}{COP} = \frac{E_{Chiller}}{COP_{Chiller}} \quad (6)$$

onde  $E_{Boiler}$  é o consumo elétrico do Boiler corrigido,  $E_{Chiller}$  é o consumo elétrico do Boiler com o COP de 1 kW/kW e  $COP_{Chiller}$  é o valor do COP correspondente a capacidade nominal de aquecimento do Chiller em ciclo reverso. Esse valor é obtido no manual do fabricante.

## 5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O caso apresentado nesse trabalho trata-se de um prédio histórico, localizado na UFRGS em Porto Alegre – RS. Ela possui quatro pavimentos, sendo um deles subsolo e por se tratar de uma edificação histórica, possui uma elevada inércia térmica.

### 5.1. EDIFICAÇÃO

As zonas térmicas são definidas no *EnergyPlus* como um volume de ar a temperatura uniforme (*EnergyPlus*, 2008), com o envoltório constituído de superfícies de troca térmica, como paredes, pisos, tetos, portas e janelas.

Para fins de simulação a edificação foi dividida em 35 zonas térmicas, levando-se em conta todos os ambientes do prédio o mais próximo possível das características arquitetônicas do prédio. Dessas 35 zonas, quatro não foram consideradas climatizadas, por se tratarem de zonas de circulação e pouca ocupação. O apêndice A apresenta a divisão de cada pavimento, com suas respectivas zonas.

Foram considerados os sombreamentos externos devido a árvores e prédios no entorno da edificação. A figura 2 apresenta uma comparação entre o modelo criado no *Open Studio* com as ferramentas do *Google Sketchup*, e uma foto tirada do prédio. O Sombreamento presente no modelo corresponde ao mesmo horário e dia em que a foto foi tirada.

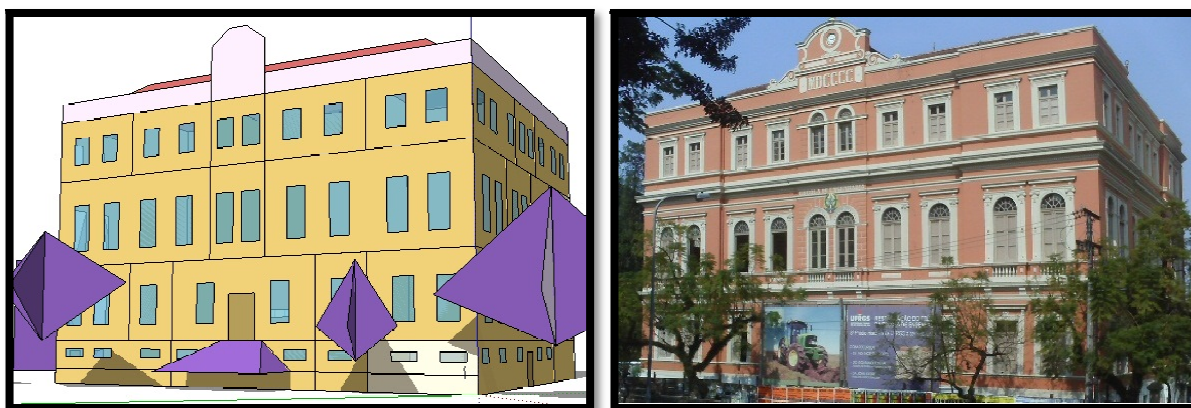


Figura 2 – Comparação entre o modelo criado e o prédio real

#### 5.1.1. Construções

Os elementos de construção como paredes, telhados, pisos, janelas e portas foram obtidos a partir das informações disponíveis nas plantas-baixas e cortes da edificação, além de informações obtidas com os arquitetos da Secretaria do Patrimônio Histórico da UFRGS. As propriedades termofísicas dos materiais utilizados seguem as informações conforme (ORDE-

NES et al., 2003) e (ABNT, 2003). O apêndice B trás uma tabela com as propriedades dos materiais utilizados nessa edificação.

### 5.1.2. Cargas Internas

As cargas internas correspondem a uma grande parcela do calor liberado ao ambiente. Essas cargas correspondem ao calor liberado por pessoas, equipamentos elétricos, iluminação e infiltrações de ar.

#### 5.1.2.1. Equipamentos

Os equipamentos são responsáveis por grande parte da carga térmica de um ambiente. Para as diversas zonas da edificação citam-se equipamentos como: computadores, impressoras, televisores, cafeteiras, refrigeradores. Para a carga dos equipamentos seguiram-se as recomendações propostas pela ABNT (2008). O apêndice C apresenta uma tabela com as informações das cargas de equipamentos utilizadas para cada ambiente do prédio.

#### 5.1.2.2. Pessoas

Para a determinação do nível de ocupação dos ambientes do prédio utilizaram-se as recomendações propostas pela ABNT (2008). O apêndice C apresenta uma tabela com os valores utilizados para cada zona da edificação. Foi considerada uma taxa de renovação de ar para os ambientes de 7,5 L/s, conforme a ANVISA (2008).

#### 5.1.2.3. Iluminação

Para a iluminação foram utilizadas as recomendações propostas na ABNT (2008). O apêndice C apresenta para ara cada ambiente do prédio a potência de iluminação utilizada.

#### 5.1.2.4. Infiltração

Foi considerado que nas zonas simuladas com ar-condicionado não há infiltração, pois se admitiu pressão positiva nos ambientes quando a máquina de ar-condicionado estiver funcionando. Para as zonas não condicionadas, considerou-se uma troca de ar por hora de três para a circulação e dois para o telhado.

### 5.1.3. Cronograma de Utilização do Prédio (*Schedules*)

Nessa etapa são declarados ao sistema itens como horários de ocupação do prédio, período de uso da iluminação e equipamentos e horários de funcionamento do ar condicionado. Esses *schedules* são representados no programa de forma percentual, onde o valor um representa a máxima utilização ou ocupação e zero corresponde ao valor mínimo. Essa descrição é feita para todos os dias da semana abrangendo 24h, podendo-se ainda estabelecer exceções para os fins de semana e feriados.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

Para realizar o dimensionamento das unidades de ar-condicionado para os sistemas de VRF e Água Gelada foi realizada a rotina proposta por Carotenuto (2009) e Carvalho (2009). Os passos dessa rotina estão descritos no apêndice D.



## 6.1. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA VRF

A primeira etapa para dimensionar o sistema ocorreu realizando-se as simulações do modelo criado em modo *autosize*. Nesse modo a simulação do sistema de ar-condicionado foi realizada com máquinas virtuais. O objetivo dessa simulação inicial é obter as máximas potências de refrigeração e aquecimento para cada ambiente da edificação. Essa simulação ocorreu utilizando-se o arquivo climático da cidade de Porto Alegre. Essa seleção foi baseada nas frequências de ocorrências cumulativas anuais de 0,4, 1,0 e 2,0% das 8760h do ano, conforme ABNT (2008). Isso significa que no valor da frequência de ocorrência cumulativa escolhida o ar-condicionado não irá conseguir atender a carga térmica da zona. O limite escolhido para esse trabalho foi de 0,4%, que correspondem à 35h anuais.

A partir das cargas térmicas para refrigeração e aquecimento, obtidas através da simulação, selecionam-se as unidades evaporadoras através do catálogo do fabricante (Daikin, 2006). Para a seleção das unidades condensadoras agrupou-se as zonas térmicas em cinco grupos. Os grupos foram divididos por orientação geográfica, com exceção dos Auditórios, que foram agrupados em um único bloco. Assim, foram classificados como: Bloco Norte, Bloco Sul, Bloco Leste, Bloco Oeste e Bloco Auditórios. A tabela 1 apresenta as unidades evaporadoras selecionadas a partir da carga térmica dos ambientes, obtidos na simulação.

Tabela 1. Unidades Evaporadoras selecionadas de acordo com a carga térmica do ambiente. A referência e os valores da capacidade de refrigeração e vazão correspondem aos valores fornecidos no catálogo do fabricante, (Daikin, 2006).

AMBIENTE	BLOCO	REFERÊNCIA	QUANTIDADE	CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO (W)	CARGA TÉRMICA CALCULADA (W)	VAZÃO DE AR DA EVAPORADORA (l/s)
SS-IND1	NORTE	FXAQ32MAVE	2	7200	7175	300
SS-IND2	NORTE	FXAQ63MAVE	1	7100	6035	317
SS-IND3	SUL	FXAQ40MAVE	2	9000	7616	400
SS-CEUE3	OESTE	FXAQ32MAVE	1	3600	3056	150
SS-CEUE12	OESTE	FXAQ63MAVE	2	14200	14075	633
SS-CAFB	LESTE	FXAQ63MAVE	2	14200	13177	633
SS-CAFA	LESTE	FXAQ50MAVE	2	11200	10823	500
1PAV-CEUEB	OESTE	FXAQ50MAVE	1	5600	5259	250
1PAV-CEUEA	OESTE	FXHQ100MAVE	2	25500	25082	833
1PAV-MEM2	NORTE	FXAQ32MAVE	1	3600	3512	150
1PAV-MEM1	NORTE	FXAQ63MAVE	1	7100	6358	317
1PAV-BIB	LESTE	FXAQ50MAVE	2	11200	10928	500
1PAV-MEMLOJ	LESTE	FXAQ63MAVE	2	14200	11475	633
1PAV-INF	SUL	FXHQ100MAVE	1	11400	10368	417
2PAV-SALCOM	OESTE	FXHQ63MAVE	2	14200	13812	583
2PAV-SECINT	NORTE	FXHQ63MAVE	2	14200	12969	583
2PAV-VICDIR	NORTE	FXAQ50MAVE	1	5600	5048	250
2PAV-SETCOM	LESTE	FXAQ50MAVE	1	5600	5145	250
2PAV-RECADM	LESTE	FXAQ50MAVE	2	11200	10963	500
2PAV-REU2	OESTE	FXAQ50MAVE	1	5600	5570	250
2PAV-REU1	SUL	FXAQ50MAVE	1	5600	5442	250
2PAV-DIR	SUL	FXAQ50MAVE	1	5600	4609	250
2PAV-CONS	SUL	FXHQ63MAVE	2	14200	14113	583
3PAV-AULA5	OESTE	FXHQ63MAVE	2	14200	13243	583
3PAV-AULA4	OESTE	FXHQ100MAVE	1	11200	11059	417
3PAV-AULA3	NORTE	FXHQ100MAVE	1	11200	10796	417
3PAV-AULA2	NORTE	FXHQ63MAVE	2	14200	13492	583
3PAV-AULA1	NORTE	FXHQ63MAVE	1	7100	6876	292
3PAV-SECAP	OESTE	FXAQ40MAVE	1	4500	3853	200
3PAV-AUD1	AUDITÓRIOS	FXFQ80MAVE	4	36000	33331	1333
3PAV-AUD2	AUDITÓRIOS	FXFQ80MAVE	4	36000	33183	1333

A tabela 2 apresenta as unidades condensadoras selecionadas. A seleção da unidade externa de cada bloco leva em conta a soma das cargas térmicas calculadas que compõem o grupo. Foi aplicado um fator de correção devido ao comprimento e desnível da tubulação de

fluido refrigerante. Os fatores de correção são obtidos no catálogo do fabricante, (Daikin, 2006).

Tabela 2. Capacidade de refrigeração para as unidades condensadoras.

BLOCO	REFERÊNCIA	CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO (W)	CARGA TÉRMICA CALCULADA (W)	COEFICIENTE DE DESEMPENHO (COP)	FATOR DE CORREÇÃO DE CAPACIDADE	CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO CORRIGIDO (W)	COEFICIENTE DE DESEMPENHO (COP)
NORTE	RXYQ28PYL	77500	72261	3,19	0,98	75950	3,13
SUL	RXYQ16PYL	45000	42148	3,17	0,99	44550	3,14
LESTE	RXYQ24PYL	67400	62511	3,47	0,98	66052	3,40
OESTE	RXYQ36PYL	98000	95009	2,98	0,97	95060	2,89
AUDITÓRIOS	RXYQ24PYL	67400	66514	3,47	1	67400	3,47

Obs.: Os valores de COP correspondem ao valor de capacidade de refrigeração nominal do equipamento e conforme (ARI 440, 2005).

## 6.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Para o dimensionamento das unidades internas do sistema de Água Gelada foi utilizado o mesmo procedimento utilizado no sistema VRF. No dimensionamento do *Chiller* utilizou-se a soma das cargas térmicas de todas as zonas da edificação e dividiu-se esse total por dois, resultando assim na seleção de dois *Chillers* para o sistema. Essa escolha foi feita para garantir que no caso de falha de um aparelho o outro ainda opere, atendendo assim parcialmente o sistema. Os *Chillers* foram configurados em paralelo e atribuídas diferentes prioridades de funcionamento. Em um primeiro momento entra em operação apenas um *Chiller* (prioridade um) e o outro fica em modo de espera (prioridade dois). Assim que o sistema necessita de mais carga de refrigeração o *Chiller* de prioridade dois entra em operação, suprimindo assim essa solicitação. Essa configuração é adotada, pois o sistema opera com apenas um circuito de refrigeração que atende todas as zonas do prédio. No aquecimento é adotada a mesma metodologia da configuração do resfriamento, sendo que aqui são utilizados dois Boilers elétricos. Adotou-se esse procedimento para simulação de um sistema de Água Gelada com ciclo reverso, como citado no item 4.4.

O apêndice E apresenta as unidades internas de resfriamento (*Fan Coil's*), selecionadas a partir da carga térmica dos ambientes, obtidos na simulação.

Pela comparação com a planilha de seleção do sistema VRF, nota-se que a carga térmica calculada dos ambientes, para o sistema de Água Gelada, tem um acréscimo de potência. Esse acréscimo se deve ao conjunto moto-ventilador, que tem por característica a potência elétrica dos ventiladores utilizados nas unidades *Fan Coil*. O apêndice F apresenta as características de desempenho do conjunto moto-ventilador no ciclo de refrigeração para as unidades internas, de ambos os sistemas, utilizadas neste trabalho.

A tabela 3 apresenta os dois *Chillers* selecionados. Essa seleção leva em conta a soma das cargas térmicas calculadas do prédio, dividindo-se o total por dois e obtendo o valor de capacidade para cada *Chiller*. Os equipamentos obedecem às capacidades obtidas pelo catálogo do fabricante, (Carrier, 2006).

Tabela 3. Capacidade de refrigeração para os *Chillers*.

PRIORIDADE	REFERÊNCIA	CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO (W)	CARGA TÉRMICA CALCULADA (W)	COEFICIENTE DE DESEMPENHO (COP)
1	30RH065	190700	179047	3,92
2	30RH065	190700	179047	3,92

Obs.: Os valores de COP correspondem ao valor de capacidade de refrigeração nominal do equipamento e conforme (ARI 440, 2005).

### 6.3. CONSUMO ELÉTRICO

O consumo mensal de energia elétrica, em kW.h, obtido para os sistemas VRF e Água Gelada é representado pelo *EnergyPlus* como o consumo elétrico da simulação de três grupos:

- Consumo elétrico total = Edificação + Ar-Condicionado;
- Edificação = Iluminação + Equipamentos;
- Ar-Condicionado = Refrigeração + Aquecimento + Ventilação

Para o sistema Água Gelada inclui-se o consumo elétrico gerado pelas bombas, o qual será acrescentado no consumo do Ar-Condicionado.

#### 6.3.1. Consumo Elétrico com o Sistema VRF

O consumo mensal do sistema VRF é apresentado no gráfico da figura 3. Nele apresenta-se a evolução do consumo gerado mensalmente para os grupos citados no item 6.3.

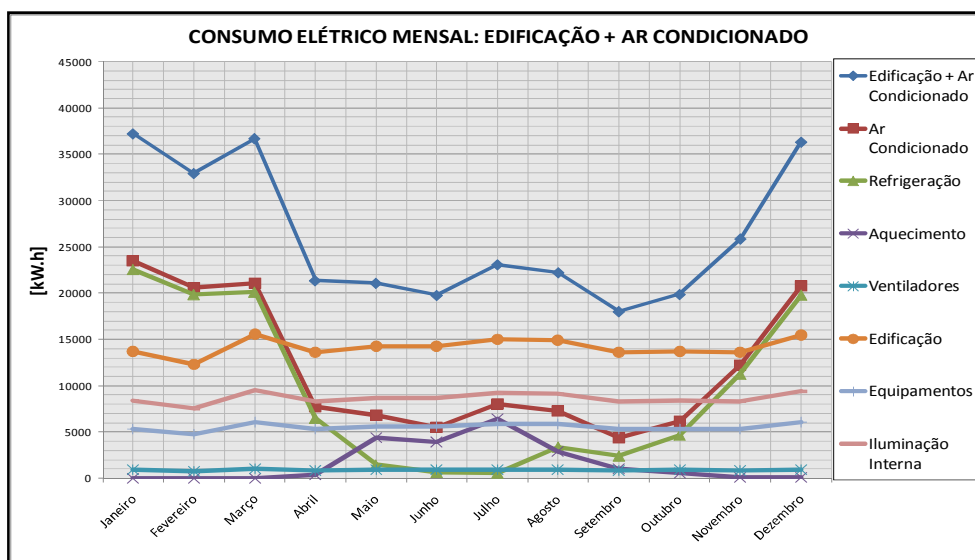


Figura 3. Consumo elétrico mensal para o sistema VRF

Analisando o consumo apresentado no gráfico da figura 3, o ar-condicionado apresenta uma grande participação nos meses de Verão (dezembro, janeiro, fevereiro e março). O consumo maior ocorre no mês de janeiro, onde o valor consumido é de 23.477 kW.h, sendo que 22.557 kW.h correspondem a refrigeração. O valor obtido para a ventilação é praticamente constante, oscilando entre 800 e 990 kW.h/mês. O sistema de ar-condicionado no aquecimento atinge seu maior valor de consumo no mês de julho com o valor de 6.437 kW.h. Esse valor para o sistema no aquecimento leva em conta o calor gerado pelos equipamentos, iluminação e pessoas.

A figura 4 mostra a participação em porcentagem dos componentes que envolvem o consumo elétrico total anual da edificação + ar-condicionado, que é de 314.420 kW.h/ano. A maior participação no consumo elétrico total anual é do ar-condicionado no ciclo de refrigeração, seguido da iluminação e dos equipamentos.

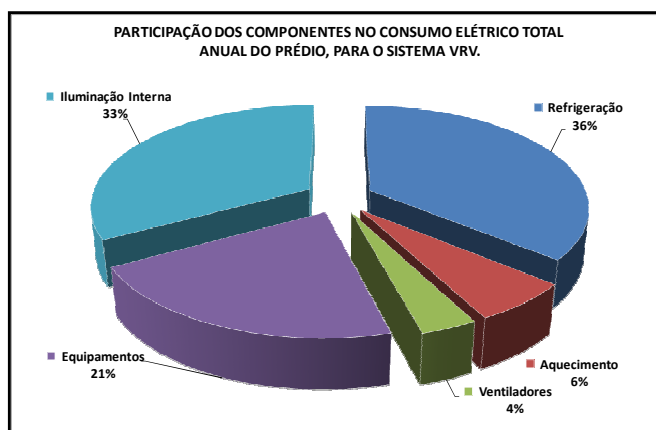


Figura 4. Participação dos componentes no consumo elétrico total anual do prédio

### 6.3.2. Consumo Elétrico com o Sistema Água Gelada

O consumo mensal gerado pelo sistema Água Gelada é apresentado a seguir no gráfico da figura 5.

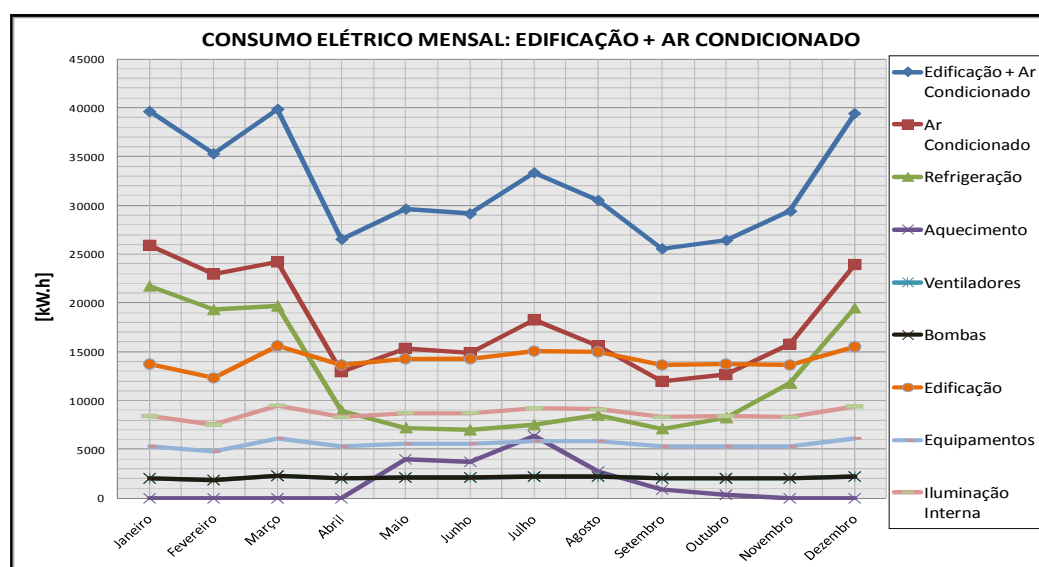


Figura 5. Consumo elétrico mensal para o sistema Água Gelada.

Semelhante ao consumo apresentado pelo sistema VRF, no sistema Água gelada o ar-condicionado representa também uma grande participação nos meses de Verão (Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março). Entretanto nesse sistema, nota-se a grande participação nos outros meses ano. O consumo maior ocorre no mês de Janeiro, onde o valor consumido é de 25.878 kW.h, sendo que 21.757 kW.h correspondem a refrigeração. O valor obtido para a ventilação é praticamente constante, oscilando entre 1.826 e 2.261 kW.h/mês, o que acontece também no consumo das bombas que oscila entre 1.817 e 2.249 kW.h/mês. O sistema de ar-condicionado no aquecimento atinge seu maior valor de consumo no mês de Julho com o valor de 6.341 kW.h. Igualmente ao VRF, esse valor para o sistema no aquecimento leva em conta o calor gerado pelos equipamentos, iluminação e pessoas.

A figura 6 mostra a participação em porcentagem dos componentes que envolvem o consumo elétrico total anual da edificação + ar-condicionado, que é de 384.662 kW.h/ano. A maior participação no consumo elétrico total anual é do ar-condicionado no ciclo de refrigeração, seguido da iluminação e dos equipamentos.

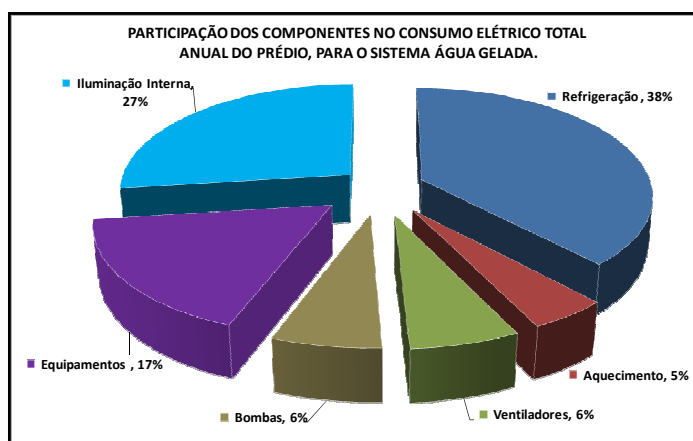


Figura 5. Participação dos componentes no consumo elétrico total anual do prédio

#### 6.4. COMPARAÇÃO DO CONSUMO ELÉTRICO ENTRE OS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO

O gráfico da figura 6, a seguir, apresenta uma comparação do consumo mensal de cada sistema de ar-condicionado, em kW.h.

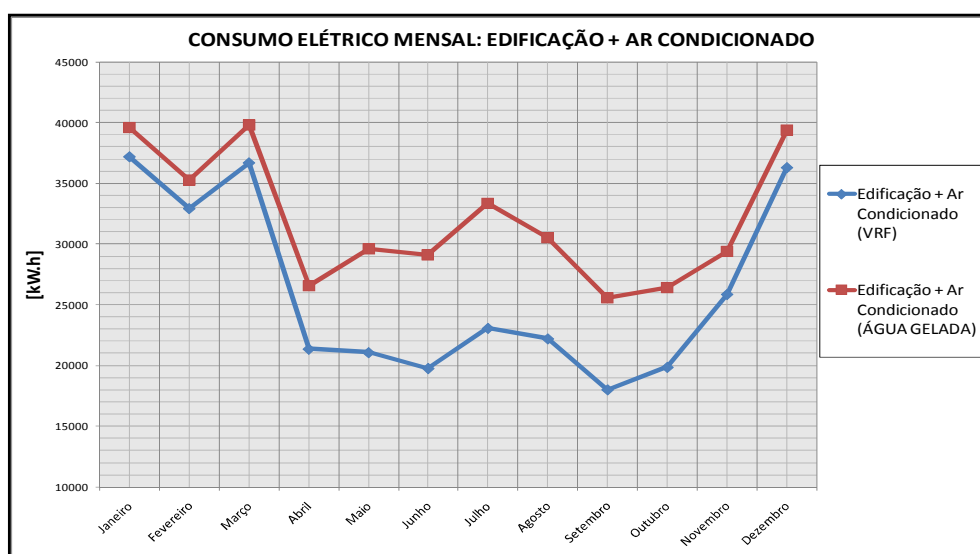


Figura 6. Comparação do o consumo elétrico mensal para os sistemas de ar-condicionado.

Analisando o gráfico da figura 6, verifica-se que há uma diferença de consumo elétrico entre os sistemas e que ela ocorre mais acentuadamente entre os meses de abril a novembro. Essa diferença acontece principalmente pela presença de bombas no sistema Água Gelada, ausentes no VRF, por um maior consumo dos ventiladores e do ciclo de refrigeração. O gráfico da figura 7 ilustra essa análise, representando o consumo anual de cada componente para ambos os sistemas de ar-condicionado. Verifica-se que o VRF consome 314.420 kW.h/ano, e o Água Gelada 384.662 kW.h o que resulta em uma diferença de consumo anual de 22,4%.

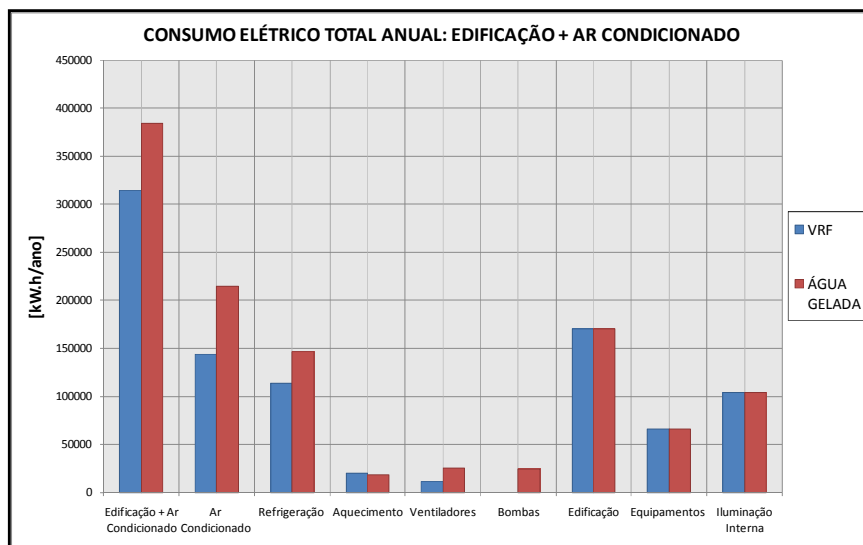


Figura 7. Comparação do consumo elétrico anual para os sistemas de ar-condicionado.

O Apêndice G apresenta a comparação do consumo elétrico mensal para os ventiladores, e para o ciclo de refrigeração entre os sistemas de ar-condicionado.

O custo da energia elétrica, em R\$, gasto mensalmente para as duas situações, foi obtido utilizando uma tarifa de R\$ 0,325930 / kWh, aplicada aos prédios do poder público, conforme (CEEE, 2010).

Na figura 8, comparam-se os valores gastos em energia elétrica pelo sistema VRF e Água Gelada.

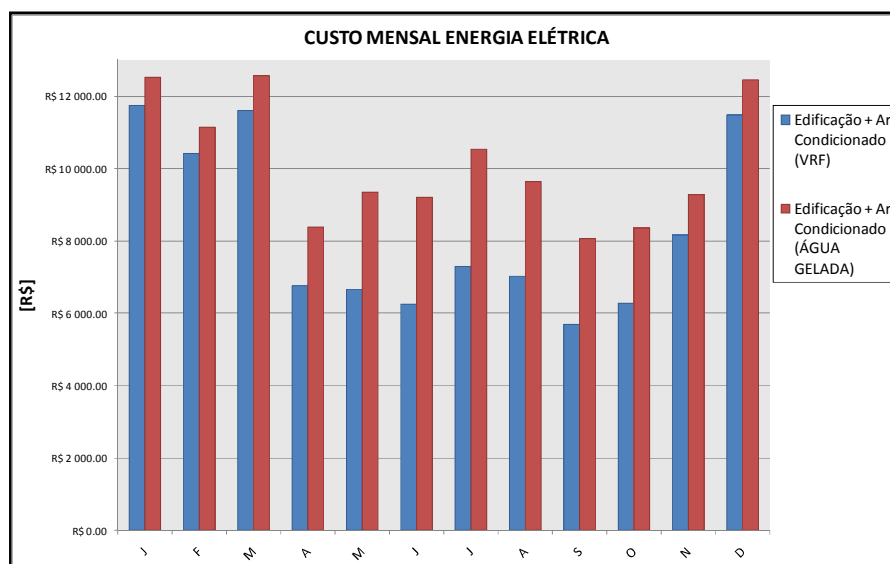


Figura 8. Custo mensal de energia elétrica para os sistemas de ar-condicionado

Verifica-se um custo maior para o sistema Água Gelada, principalmente nos meses de abril a novembro, em consequência do maior consumo elétrico para o ciclo de refrigeração e dos ventiladores, além do consumo elétrico das bombas.

## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma comparação entre dois sistemas de ar-condicionado, VRF e Água Gelada, usualmente utilizados no mercado. Através das simulações com o *EnergPlus*, e utilizando as correlações de desempenho ajustadas através dos dados obtidos nos catálogos dos fabricantes, conseguiu-se modelar os dois sistemas de ar-condicionado o mais próximo da realidade.

Com os resultados obtidos, verificou-se que o sistema VRF apresentou uma melhor eficiência energética em comparação com o Água Gelada, onde a maior diferença ocorreu entre os meses de abril a novembro. Esse maior consumo do sistema Água Gelada deve-se principalmente a três fatores: consumo das bombas, maior consumo dos ventiladores em relação ao VRF e consumo mais elevado do ciclo de refrigeração nos meses descritos anteriormente. Por se tratar de uma edificação com fachadas em diversas orientações, a incidência solar contribui para que a carga térmica do ambiente possa se elevar, ocorrendo assim a necessidade de refrigeração em algumas zonas mesmo nos meses de inverno. Assim, a utilização de refrigeração, mesmo que somente para algumas zonas, faz com que o sistema de água gelada tenha que operar de forma total para poder atender a carga térmica solicitada por esses ambientes, ao contrário do VRF que consegue suprir essa carga térmica individualmente para cada fachada da edificação.

Portanto, conclui-se que para esta edificação o sistema VRF seria mais adequado, e por ter um consumo elétrico menor que o Água Gelada, que chega a 22,4%, seria o sistema mais eficiente para esta aplicação.

O presente trabalho não realizou uma análise de viabilidade econômica dos sistemas instalados e de retorno de investimento (*payback*) para ambos. Fica como sugestão para trabalhos futuros a análise econômica de cada sistema instalado na edificação e de *payback*, para verificar se mesmo com um consumo menor de energia elétrica pelo sistema VRF compensaria em termos financeiros a aplicação desse sistema na edificação.

## REFERÊNCIAS

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

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., **ASHRAE Fundamentals Handbook**, SI Edition, Atlanta, USA, 2009.

CARVALHO, R. O. **Avaliação do Custo Energético Anual de uma Edificação Comercial Utilizando um Software de Simulação**. Monografia de Conclusão de Curso–Engenharia Mecânica - UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CAROTENUTO, A. R., **Análise do desempenho termoenergético de um prédio histórico de elevada inércia térmica**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. **Tabela de tarifa convencional**. Disponível em: < <http://www.cee.com.br>>. Acesso: 18 de novembro de 2010.

Daikin, 2006. **Engineering Data VRF III, Heat Pump**. ED 34 - 645B, Daikin Industries, Japan.

Carrier, 2006. **Catálogo técnico Hi-Wall Hidrônico**. CT 42DC – C – 04/06, Carrier.

Carrier, 2006. **Catálogo técnico FanCoil 42LS – Água Gelada Modelos Horizontais e Verticais**. CT 42LS – E – 04/06, Carrier.

Carrier, 2006. **Catálogo técnico 42GW**. CT 42GW – D – 04/06, Carrier.

Carrier, 2006. **Resfriadores de Líquidos com Condensação a Ar e Módulo Hidrônico Incorporado**. CT 30RA 30RH 012 a 075 – D – 04/06, Carrier.

ENERGYPLUS, 2010. **EnergyPlus Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**, Version 6.0, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

ENERGYPLUS, 2010. **EnergyPlus Engineering Document – The Reference to EnergyPlus Calculations**, Version 6.0., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

BASILE, A. P. (2009). **VRF e Água Gelada: eficiência está no projeto**. *Climatização e Refrigeração*, n. 109, p. 40-49, 2009.

#### **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

BEYER, Paulo Otto, et al. Simulação termoenergética de uma sala com o Energy Plus, A ser apresentado em: X Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento de Ar. São Paulo, 2007.



## APÊNDICE A – DIVISÃO DAS ZONAS PARA SIMULAÇÃO

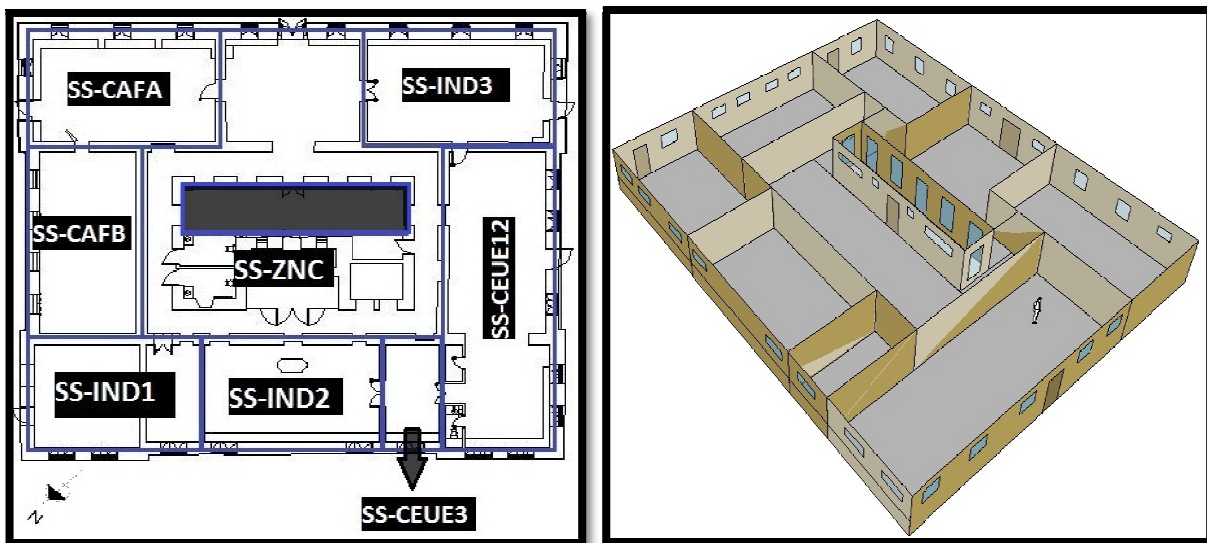


Figura A1. Divisão das zonas para o Subsolo.

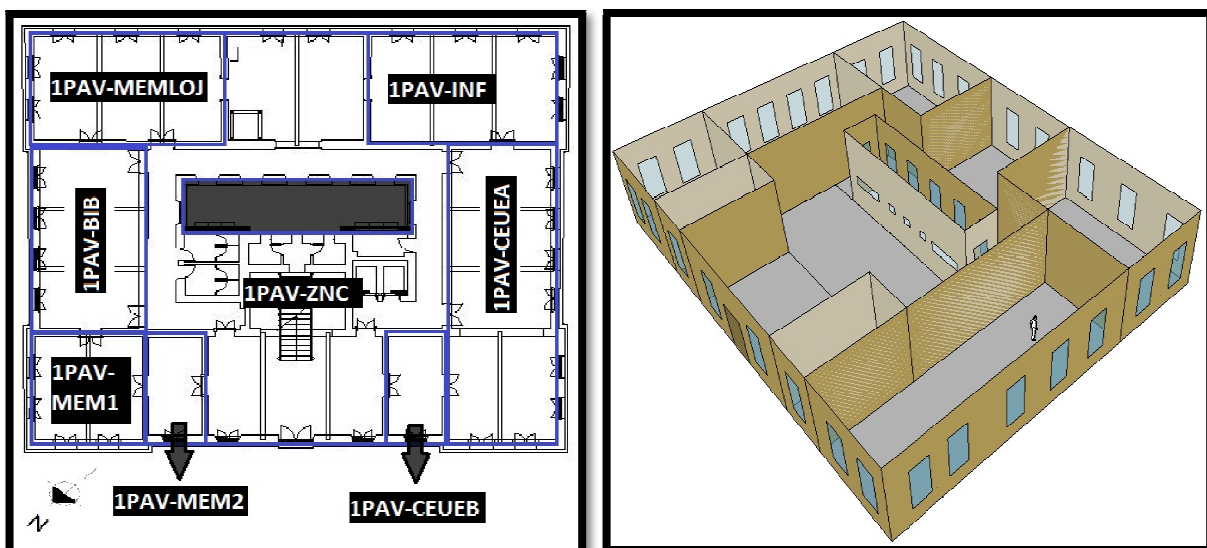


Figura A2. Divisão das zonas para o 1º Pavimento

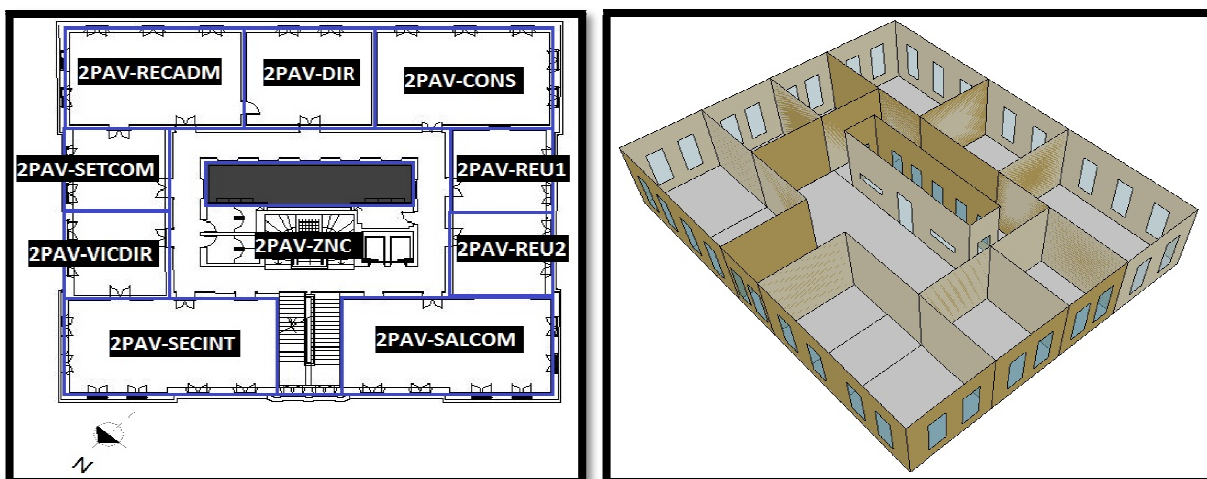


Figura A3. Divisão das zonas para o 2º Pavimento

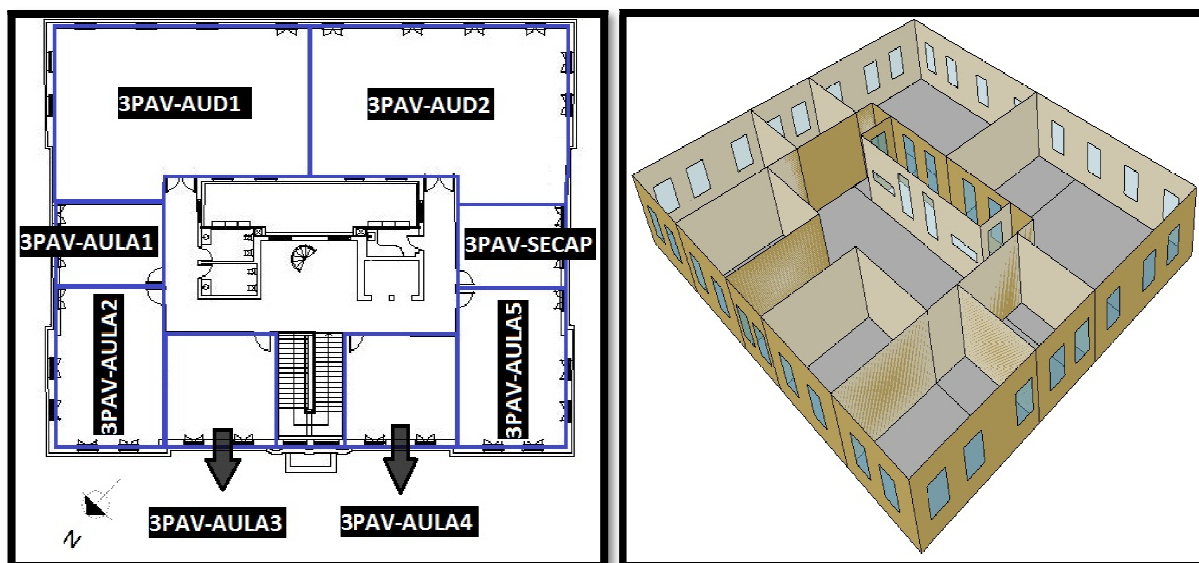


Figura A4. Divisão das zonas para o 3º Pavimento

## APÊNDICE B – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS.

Tabela B1. Composição das superfícies e principais propriedades termofísicas, dos materiais utilizados na edificação.

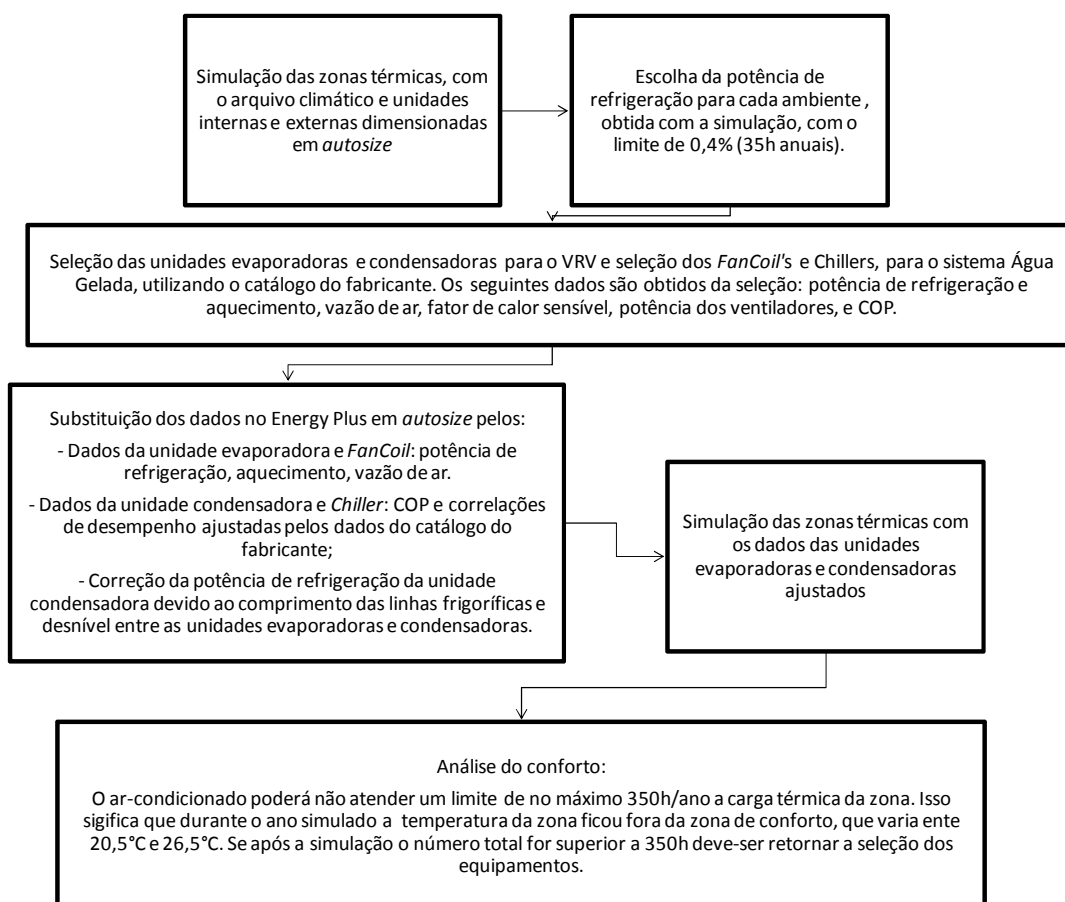
SUPERFÍCIES	CAMADA	MATERIAL	L	K	$\rho$	$C_p$	R
Telhado	1	Telha francesa	10	1.05	2000	920	-
Janelas	1	Vidro comum	3	0.90	-	-	-
Porta-1	1	Superfície metálica	0.8	45.28	7824	500	-
	2	Camada de ar vertical	-	-	-	-	0.12
	3	Superfície metálica	0.8	45.28	7824	500	-
Porta-2	1	Madeira Imbuia	35	0.23	650	1340	-
	2	Camada de ar vertical	-	-	-	-	0.12
	3	Madeira Imbuia	35	0.23	650	1340	-
Piso Subsolo-1	1	Solo	457	0.87	1361	837.7	-
	2	Brita ou Seixo	200	0.70	1250	800	-
	3	Solo	457	0.87	1361	837.7	-
	4	Granito lixado/polido	25	3.00	2600	840	-
Piso Subsolo-2	1	Solo	457	0.87	1361	837.7	-
	2	Brita ou Seixo	200	0.70	1250	800	-
	3	Solo	457	0.87	1361	837.7	-
Piso 1º PAV-1	4	Madeira Cumaru	20	0.29	1000	1340	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Piso 1º PAV-2	4	Piso cerâmico	10	0.90	1600	920	-
	1	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
	2	Camada de ar p/ cima	-	-	-	-	0.11
	3	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
Piso 1º PAV-3	4	Madeira Cumaru	20	0.29	1000	1340	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Piso 1º PAV-4	4	Madeira Cumaru	20	0.29	1000	1340	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Piso 2º PAV	1	Madeira Garapeira	20	0.29	830	1340	-
	2	Poliestireno expandido moldado	30	0.04	35	1420	-
	3	Compensado	20	0.15	450	2300	-
	4	Camada de ar p/ cima	-	-	-	-	0.11
	5	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
Piso 3º PAV-1	6	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Piso 3º PAV-2	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	4	Compensado	20	0.15	450	2300	-
Piso 3º PAV-3	5	Poliestireno expandido moldado	30	0.04	35	1420	-
	6	Madeira Garapeira	20	0.29	830	1340	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
Piso 3º PAV-4	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	4	Compensado	20	0.15	450	2300	-
	5	Poliestireno expandido moldado	30	0.04	35	1420	-
	6	Madeira Garapeira	20	0.29	830	1340	-
Forro Subsolo-1	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	4	Compensado	20	0.15	450	2300	-
Forro Subsolo-2	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
	4	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro Subsolo-3	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
	4	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro Subsolo-4	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
	4	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro 1º PAV-1	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	4	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro 1º PAV-2	1	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	4	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
Forro 2º PAV-1	5	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
Forro 2º PAV-2	4	Compensado	20	0.15	450	2300	-
	5	Poliestireno expandido moldado	30	0.04	35	1420	-
	6	Madeira Garapeira	20	0.29	830	1340	-
	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Forro 2º PAV-3	2	Laje de concreto	300	1.75	2200	1000	-
	3	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
	4	Laje mista	120	1.05	1087	920	-
	5	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro 3º PAV-1	1	Laje mista	120	1.05	1087	920	-
	2	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	3	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
	4	Madeira Cumaru	25	1.15	2000	1000	-
Forro 3º PAV-2	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Laje mista	120	1.05	1087	920	-
	3	Camada de ar p/ baixo	-	-	-	-	0.16
	4	Placa de gesso	15	0.35	900	840	-
Parede Externa Subsolo	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	750	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Externa 1º e 2º PAV	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	450	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Externa 3º PAV	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	350	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Interna 15cm	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	100	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Interna 20cm	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	150	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Interna 35cm	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	300	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Interna 50cm	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	450	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
Parede Interna 60cm	1	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-
	2	Tijolo maciço	550	0.90	1800	920	-
	3	Argamassa e reboco	25	1.15	2000	1000	-

## APÊNDICE C – CARGAS INTERNAS

Tabela C1. Cargas internas utilizadas nas simulações

AMBIENTE	OCUPAÇÃO		POTÊNCIA DE ILUMINAÇÃO	POTÊNCIA DE EQUIPAMENTO		AMBIENTE	OCUPAÇÃO		POTÊNCIA DE ILUMINAÇÃO	POTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS	
	Pessoas	Pessoas/m <sup>2</sup>	W	W	W/m <sup>2</sup>		Pessoas	Pessoas/m <sup>2</sup>	W	W	W/m <sup>2</sup>
SS-IND1	-	0.3	600	-	16.2	2PAV-VICDIR	7	-	600	350	-
SS-IND2	-	0.3	520	-	16.2	2PAV-SETCOM	7	-	600	700	-
SS-IND3	-	0.3	600	-	16.2	2PAV-RECADM	20	-	800	1050	-
SS-CEUE3	10	-	200	500	-	2PAV-REU2	10	-	650	525	-
SS-CEUE12	40	-	900	750	-	2PAV-REU1	10	-	650	525	-
SS-CAFB	52	-	1600	2000	-	2PAV-DIR	5	-	650	350	-
SS-CAFA	20	-	2500	5710	-	2PAV-CONS	35	-	650	1750	-
1PAV-CEUEB	16	-	200	250	-	3PAV-AULA5	60	-	600	350	-
1PAV-CEUEA	80	-	1000	1000	-	3PAV-AULA4	45	-	400	350	-
1PAV-MEM2	-	0.2	900	250	-	3PAV-AULA3	40	-	400	350	-
1PAV-MEM1	-	0.2	1200	250	-	3PAV-AULA2	60	-	600	350	-
1PAV-BIB	-	0.4	2600	500	-	3PAV-AULA1	30	-	400	350	-
1PAV-MEMLOJ	-	0.3	2100	250	-	3PAV-SECAP	5	-	400	350	-
1PAV-INF	25	-	600	4025	-	3PAV-AUD1	120	-	3300	500	-
2PAV-SALCOM	23	-	1000	1050	-	3PAV-AUD2	120	-	3325	500	-
2PAV-SECINT	20	-	1000	1050	-						

## APÊNDICE D – ROTINA DE SIMULAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO



## APÊNDICE E – TABELA DE SELEÇÃO DAS UNIDADES *FANCOIL*

Tabela E1. Unidades *FanCoil* selecionadas de acordo com a carga térmica do ambiente. A referência e os valores da capacidade de refrigeração e vazão correspondem aos valores fornecidos no catálogo do fabricante, (Carrier, 2006).

AMBIENTE	REFERÊNCIA	QUANTIDADE	CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO (W)	CARGA TÉRMICA CALCULADA (W)	VAZÃO DE AR TOTAL DO(S) FAN COIL(S) (l/s)
SS-IND1	42DCA014	2	7680	7606	350
SS-IND2	42DCA024	1	6480	6397	289
SS-IND3	42DCA020	2	11200	8073	556
SS-CEUE3	42DCA014	1	3840	3239	175
SS-CEUE12	42LSA025	2	16010	14920	675
SS-CAFB	42LSA025	2	16010	13968	675
SS-CAFA	42DCA024	2	12960	11472	578
1PAV-CEUEB	42DCA020	1	5560	5437	278
1PAV-CEUEA	42LSA48	2	28204	26587	1203
1PAV-MEM2	42DCA014	1	3840	3723	175
1PAV-MEM1	42DCA024	1	6480	6428	289
1PAV-BIB	42LSA020	2	11656	11584	472
1PAV-MEMLOJ	42DCA024	2	12960	12164	578
1PAV-INF	42LSA36	1	11110	10990	488
2PAV-SALCOM	42LSA25	2	16010	14641	675
2PAV-SECINT	42LSA25	2	16010	13747	675
2PAV-VICDIR	42DCA020	1	5560	5351	278
2PAV-SETCOM	42DCA020	1	5560	5454	278
2PAV-RECADM	42LSA20	2	11656	11621	472
2PAV-REU2	42DCA024	1	6480	5904	289
2PAV-REU1	42DCA024	1	6480	5769	289
2PAV-DIR	42DCA020	1	5560	4886	175
2PAV-CONS	42LSA25	2	16010	14960	675
3PAV-AULA5	42LSA25	2	16010	14038	675
3PAV-AULA4	42LSA20	1	11656	11516	236
3PAV-AULA3	42LSA20	1	11656	11444	236
3PAV-AULA2	42LSA25	2	16010	14302	675
3PAV-AULA1	42LSA25	1	8005	7289	338
3PAV-SECAP	42DCA020	1	5560	4084	278
3PAV-AUD1	42GWC010	4	44000	35331	1944
3PAV-AUD2	42GWC010	4	44000	35174	1944

## APÊNDICE F – CONJUNTO MOTO-VENTILADOR

Uma das passos necessários para a simulação dos sistemas de ar-condicionado é o dimensionamento do conjunto moto-ventilador. As principais características para o desempenho do conjunto moto-ventilador para as unidades internas selecionadas são a potência elétrica do motor, a vazão de ar e o acréscimo de pressão do ventilador.

A potência elétrica e a vazão de ar são obtidas através do catálogo do fabricante e para obter o acréscimo de pressão do ventilador é necessário conhecer o valor da eficiência total do conjunto moto-ventilador, sendo que esta é o produto da eficiência do motor pela eficiência do ventilador. Para esses valores de eficiência são utilizados os dados recomendados pelo *EnergyPlus*. As eficiências do motor e do ventilador recomendadas são 0,9 e 0,7, respectivamente. Portanto, a eficiência total do conjunto moto-ventilador para as unidades evaporadoras selecionadas é de 0,63.

O acréscimo de pressão do ventilador é calculado a 101325 Pa e a 20 °C, sendo que este valor corresponde a divisão da potência elétrica do motor, em W, pela vazão de ar, em m<sup>3</sup>/s, multiplicados pela eficiência total do conjunto moto-ventilador. A tabela F1 apresenta os valores obtidos para as unidades internas utilizadas nas simulações.

Tabela F1. Características de desempenho do conjunto moto-ventilador no ciclo de refrigeração para as unidades internas.

UNIDADE EVAPORADORA	POTÊNCIA ELÉTRICA DO MOTOR (W)	VAZÃO DE AR (l/s)	ACRÉSCIMO DE PRESSÃO DO VENTILADOR (Pa)	UNIDADE FANCOIL	POTÊNCIA ELÉTRICA DO MOTOR (W)	VAZÃO DE AR (l/s)	ACRÉSCIMO DE PRESSÃO DO VENTILADOR (Pa)
FXAQ32MAVE	40	150	168	42DCA014	50	630	180
FXAQ40MAVE	43	200	135	42DCA020	65	1000	147
FXAQ50MAVE	43	250	108	42DCA024	70	1040	153
FXAQ63MAVE	43	317	86	42LSA020	133	850	355
FXHQ63MAVE	62	292	134	42LSA025	162	1215	302
FXHQ100MAVE	130	417	197	42LSA036	328	1758	423
FXFQ80MAVE	30	333	57	42LSA048	324	2166	339
				42GWC010	135	1300	236

## APÊNDICE G – COMPARAÇÃO INDIVIDUAL ENTRE COMPONENTES DOS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

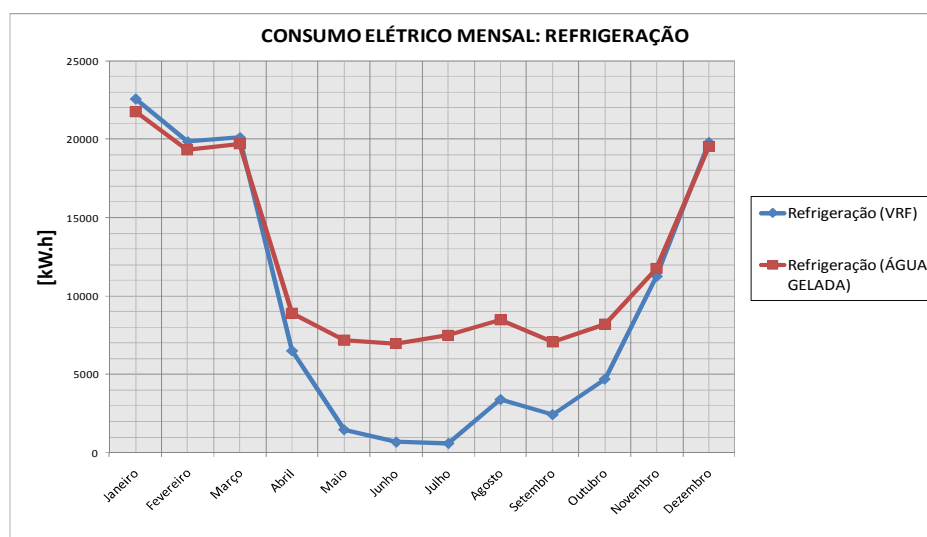


Figura G1. Comparação do consumo mensal elétrico do ciclo de refrigeração.

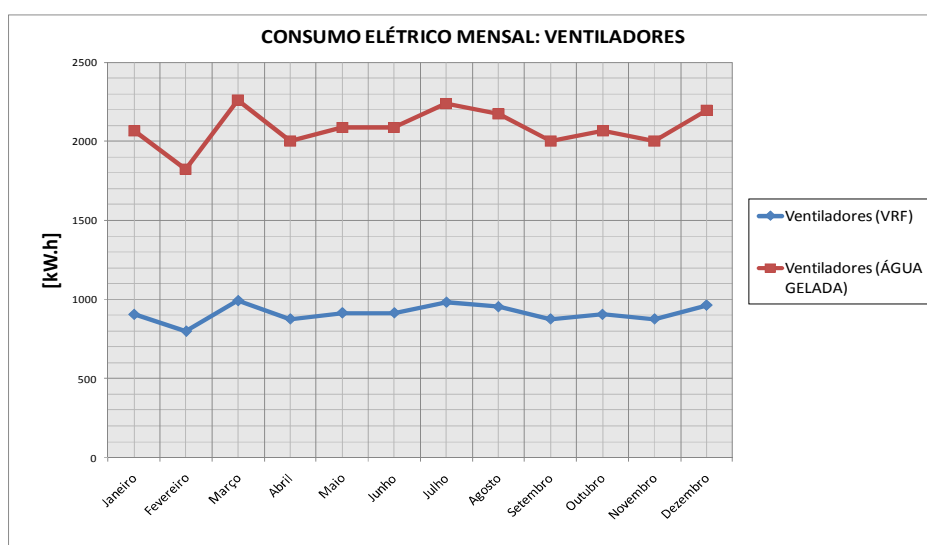


Figura G2. Comparação do consumo mensal elétrico dos ventiladores