

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO  
E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS

por

Luciano Piccoli Brasiliense

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.

Porto Alegre, Dezembro de 2012



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

SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO  
E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS

por

Luciano Piccoli Brasiliense

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

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio V. Möller

Prof. Dr. Horácio A. Vielmo

Prof. Dr. Sérgio L. Frey

Porto Alegre, 10 de Dezembro de 2012.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marcio e Lara, por todo amor, carinho, apoio e incentivo ao longo da minha vida. Esta etapa, assim como tantas outras, não seria possível sem vocês.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer*, sempre disposto em compartilhar seus valiosos conhecimentos, por toda ajuda e disponibilidade nesta importante etapa.

A minha namorada Isadora, por todo carinho, incentivo e habilidade em transformar os momentos ao seu lado.

Ao meu amigo e colega *Eng. Tiago Silva Stein*, por todo direcionamento, incentivo e cobrança ao longo deste trabalho. Muito obrigado.

Aos meus irmãos, amigos e colegas de faculdade que, por longos anos, viveram este sonho comigo.

A empresa Artetec, seus sócios, funcionários e colaboradores, por me proporcionar um ambiente de grande aprendizado ao longo deste último ano.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.”  
*Eleanor Roosevelt*

BRASILIENSE, L. P. **Simulação Termo-Energética de uma Edificação e Proposição de Melhorias**. 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## RESUMO

Dada a crescente preocupação da sociedade pela redução do consumo dos meios naturais, redução dos impactos ambientais e, principalmente, dos custos provenientes das atividades humana, busca-se neste trabalho avaliar a eficiência termo-energética de um projeto de um edificação comercial a ser construída na cidade de Porto Alegre, levando-se em conta para isto, a análise do consumo energético provenientes da iluminação e climatização da edificação proposta. A fim de se obter uma análise tão próxima da realidade quanto possível, serão utilizadas ferramentas de simulação computacional como *Hourly Analysis Program* e *EnergyPlus*, assim como dados de fabricantes de equipamentos, fazendo-se os devidos ajustes quando necessários. Serão levantados os dados pertinentes ao Projeto Base da edificação, para, a partir disto, avaliar e propor uma alternativa quanto ao tipo e configuração dos sistemas de iluminação e climatização. Serão propostas ainda breves intervenções arquitetônicas, de forma a possibilitar a implantação de uma alternativa. Busca-se demonstrar neste trabalho que, por meio de um estudo aprofundado acerca das necessidades e possibilidades da edificação, torna-se possível uma alternativa de forma a reduzir o consumo energético, reduzindo-se assim, o consumo dos meios naturais, o impacto ambiental e o custo operacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação termo-energética, ar condicionado VRF, água gelada, *EnergyPlus*.

BRASILIENSE, L. P. **Thermo Energetic Simulation of a Building and Improvements Proposition.** 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

Given the increasing concern of society in reduce the consumption of natural resources, reducing environmental impacts, and especially, the costs arising from human activities, is pursued in this work evaluate the thermo energetic efficiency of a commercial building project to be built in the city of Porto Alegre, taking into account for this, the analysis of energy consumption with lighting and cooling for the proposal building. In order to obtain an analisys as closer to reality as possible, will be used computacional simulation tools as *Hourly Analysis Program* and *EnergyPlus*, as well as data from the equipment manufacturer, making appropriate adjustments when necessary. Relevant data will be collected from the Base Project of the building, and, from this, will be evaluated and proposed an alternative about the type and configuration of lighting systems and HVAC. Simple architectural interventions will be proposed in order to enable the implementation of an alternative. Is pursued demonstrate in this work that, through a detailed study of the needs and possibilities of the building, it becomes possible an alternative to reduce energy consumption, reducing the consumption of natural resources, environmental impact and operational cost.

**KEYWORDS:** Thermo energetic simulation, VRF air conditioning, chilled water, *EnergyPlus*.

## ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 1  |
| 1.1   | OBJETIVOS .....   | 1  |
| 1.2   | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 1  |
| 1.3   | METODOLOGIA .....   | 1  |
| 2     | FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS .....  | 2  |
| 2.1   | <i>HOURLY ANALYSIS PROGRAM</i> .....  | 2  |
| 2.1.1 | Dados de Saída .....  | 2  |
| 2.2   | <i>GOOGLE SKETCHUP</i> .....  | 2  |
| 2.3   | <i>OPEN STUDIO</i> .....  | 2  |
| 2.4   | <i>ENERGYPLUS</i> .....   | 3  |
| 2.4.1 | Dias de Projeto .....   | 3  |
| 2.4.2 | Arquivo Climático .....   | 3  |
| 2.4.3 | Cronograma de Utilização e Ocupação do Prédio .....   | 4  |
| 2.4.4 | Dados De Saída .....  | 4  |
| 3     | BALANÇO DE ENERGIA DA ZONA TÉRMICA .....  | 4  |
| 3.1   | EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA DA ZONA TÉRMICA.....  | 4  |
| 3.2   | FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA POR CONDUÇÃO .....   | 5  |
| 3.3   | BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE EXTERNA DA ZONA TÉRMICA .....  | 6  |
| 3.4   | BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE INTERNA DA ZONA TÉRMICA .....  | 6  |
| 4     | A EDIFICAÇÃO .....  | 7  |
| 4.1   | CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....  | 7  |
| 4.2   | CARGAS INTERNAS .....   | 8  |
| 4.2.1 | Equipamentos elétricos .....  | 8  |
| 4.2.2 | Pessoas .....   | 9  |
| 4.2.3 | Iluminação Interna .....  | 9  |
| 4.2.4 | Renovação de ar .....   | 9  |
| 5     | CLIMATIZAÇÃO PREVISTA NO PROJETO BASE .....   | 9  |
| 5.1   | SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROJETO BASE .....   | 9  |
| 5.2   | ALTERAÇÕES DE PROJETO PROPOSTAS .....   | 10 |
| 5.3   | Implantação de Sistema de Climatização por Expansão Direta com Fluxo de Refrigerante Variável (VRF) ..... | 10 |
| 5.3.1 | Definição .....   | 10 |
| 5.3.2 | Aspectos Considerados para a Implantação do Sistema VRF .....   | 10 |
| 5.3.3 | Dimensionamento do Sistema .....  | 10 |
| 5.4   | Controle da Iluminação Interna .....  | 11 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.5 | COMPARAÇÕES ENTRE OS PROJETOS BASE E PROPOSTO ..... | 11 |
| 6   | CONCLUSÕES .....                                    | 14 |
|     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                    | 15 |
|     | Anexo A .....                                       | 16 |
|     | Anexo B .....                                       | 17 |
|     | Anexo C .....                                       | 18 |
|     | Anexo D .....                                       | 19 |
|     | Anexo E .....                                       | 20 |



## 1. INTRODUÇÃO

Inserida no cenário urbano em que se encontra, a sociedade moderna vem buscando diariamente produtos e soluções que reduzam ao máximo o desperdício relacionado às atividades humanas. Neste contexto, a procura por construções tecnológicas e eficientes, que aproveitam de forma otimizada os recursos naturais, de forma a reduzir seu impacto ambiental, e principalmente, reduzir os custos provenientes da sua operação e manutenção, encontra seu espaço.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, 2009, até 2030 haverá um aumento superior a 87% na demanda de energia. Isto posto, identifica-se que é possível otimizar a eficiência termo-energética de uma construção, através de simulação computacional, identificando os principais fatores responsáveis pelo consumo de energia elétrica.

Diversos estudos e trabalhos realizados na área demonstram que a utilização de recursos computacionais, apresenta-se como uma eficiente ferramenta na busca por soluções de redução do consumo de energia elétrica, justificando assim, a relevância deste trabalho.

### 1.1. OBJETIVO

Este trabalho objetiva demonstrar que torna-se possível soluções de forma a reduzir o consumo energético de uma edificação, reduzindo-se assim, o consumo dos meios naturais, o impacto ambiental e o custo operação e manutenção.

### 1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu no final do século XX, pela constatação de que o desenvolvimento econômico também tem que levar em conta o equilíbrio ecológico e a preservação da qualidade de vida das populações a nível global. O homem deve gastar os recursos naturais de acordo com a capacidade de renovação desses recursos, de modo a evitar seu esgotamento (Manual de eficiência energética, 2010).

Segundo Carotenuto, 2009, os maiores responsáveis pelo consumo de energia em uma edificação, de elevada inércia térmica, são os equipamentos, seguidos da iluminação interna e o sistema de climatização.

Stein, 2011, realizou a comparação entre os sistemas de climatização por expansão direta com fluxo de refrigerante variável (VRF) com o sistema por expansão indireta com água gelada, em um prédio comercial visando a eficiência energética.

### 1.3. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho consiste das seguintes etapas:

1ª Etapa: Inserção dos parâmetros que definem a edificação, como características construtivas, posicionamento geográfico e azimutal, sombreamentos, carga térmica devido a ocupação, iluminação e equipamentos, utilizando a ferramenta de simulação computacional *Hourly Analysis Program*, para estimativa preliminar da carga térmica necessária a um pavimento típico da edificação.

2ª Etapa: Levantamento dos dados pertinentes ao Projeto Base da edificação, para, a partir disto, avaliar e propor uma alternativa quanto ao tipo e configuração dos sistemas de iluminação, ventilação e climatização. Serão propostas ainda breves intervenções arquitetônicas, de forma a possibilitar a implantação da alternativa.

3ª Etapa: Através do programa *Google SketchUp*, com *plugin Open Studio*, desenvolve-se o modelamento em três dimensões de toda a envoltória da edificação, ou seja, todas as superfícies constituintes do modelo, como paredes, pisos, forros, portas e janelas. Por

consequente, divide-se a edificação em diferentes zonas térmicas. Entende-se por zonas térmicas os ambientes que apresentam um mesmo regime de utilização e um mesmo perfil de carga térmica, segundo ABNT 2008.

4ª Etapa: Utilizando o modelamento tridimensional desenvolvido na etapa anterior, efetua-se a descrição completa dos parâmetros da edificação, como desenvolvido na 1ª etapa, com a configuração dos sistemas propostos no Projeto Base, sendo declarado como Projeto Base, e simulação no *EnergyPlus*. Após, serão inseridas as alterações de projeto e intervenções arquitetônicas, sendo o modelo novamente simulado no *EnergyPlus* e seus resultados declarados como Projeto Proposto. Como última análise, os resultados dos Projetos Base e Proposto serão comparados, para avaliação se o objetivo da redução do consumo de energia, como proposto, foi atingido.

## 2. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Para estimativa e pré-dimensionamento do novo sistema de ar condicionado, obtendo-se valores de potência de refrigeração e aquecimento, vazão de ar e temperatura, utilizou-se o programa *Hourly Analysis Program*.

Para o modelamento tridimensional e simulação termo-energética da edificação, utilizou-se o programa *Google SketchUp*, juntamente com o aplicativo *Open Studio* para o modelamento tridimensional da edificação, e posterior simulação termo-energética do modelo através do programa *EnergyPlus*.

### 2.1. HOURLY ANALYSIS PROGRAM

O *Hourly Analysis Program* é um programa computacional de simulação de carga térmica de refrigeração e de aquecimento, por meio da análise de diversos parâmetros que influenciam sua dinâmica térmica, como características físico construtivas da edificação, posicionamento geográfico e azimutal, dias de projeto e condições climáticas para a cidade de Porto Alegre, sombreamentos, temperaturas operativas dos ambientes, fluxo de calor através das superfícies envoltórias, assim como sistemas mecânicos e elétricos associados. O *Hourly Analysis Program* está na versão 4.41.

#### 2.1.1. Dados de Saída

O programa *Hourly Analysis Program* pode gerar diferentes dados de saída. Para as simulações deste trabalho, foram solicitados os relatórios necessários para o pré-dimensionamento do novo sistema de ar condicionado, sendo eles: a potência de refrigeração e aquecimento, a vazão de ar e a temperatura. O relatório gerado pelo programa *Hourly Analysis Program* para um pavimento típico da edificação pode ser visualizado no Anexo D.

### 2.2. GOOGLE SKETCHUP

É um programa de modelagem tridimensional, desenvolvido pela *At Last Software*, para uma rápida construção de modelos arquitetônicos. Atualmente, o *Google Sketchup* encontra-se na versão 8.0.

### 2.3. OPEN STUDIO

Trata-se de um aplicativo para o programa *Google Sketchup* para a criação de superfícies tridimensionais e zonas térmicas entendidas pelo programa *EnergyPlus*. Ele proporciona a exploração geométrica dos modelos tridimensionais de entrada do *EnergyPlus*,

utilizando recursos do *Google Sketchup*, caracterizando as superfícies construtivas e envoltórias da edificação. O aplicativo permite diferentes tipos de renderizações das superfícies, conforme parâmetros estabelecidos, permitindo ainda a avaliação dos efeitos de sombreamento. Desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis, do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o *Open Studio* está na versão 1.0.7, podendo ser adquirido gratuitamente na página do DOE.

## 2.4. ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação de carga térmica de refrigeração e de aquecimento, e de análise de consumo de energia elétrica, por meio da análise de diversos parâmetros que influenciam sua dinâmica térmica, como características físico construtivas da edificação, posicionamento geográfico e azimutal, dias de projeto e condições climáticas para a cidade de Porto Alegre, sombreamentos, temperaturas operativas dos ambientes, fluxo de calor através das superfícies envoltórias, assim como sistemas mecânicos e elétricos associados. A ferramenta possibilita ainda a simulação de diferentes sistemas de climatização. O *EnergyPlus* está na versão 7.1.

Este programa possui raízes em dois outros programas: *BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)* e *DOE (Department of Energy)*. Ambos iniciaram seu desenvolvimento na década de 70 como ferramentas de simulação de carga térmica e de análise do consumo de energia elétrica. Estes dois programas foram desenvolvidos devido as preocupações pela crise mundial de energia na década de 70 e mais tarde o reconhecimento de que o consumo de energia elétrica em edificações é o principal componente do consumo total de energia elétrica do país [Strand, R., et al. 1999].

### 2.4.1. Dias de Projeto

Os dias de projeto são utilizados para o dimensionamento do sistema de climatização, e estão definidos pela ASHRAE [2009].

Os dados assumidos para os dias de projeto incluem valores como: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento e direções de ocorrências, claridade do céu, entre outros. Os valores para os dias de projeto de Porto Alegre foram obtidos no período de 1982 a 1993 pela ASHRAE [2001a].

Para as simulações realizadas neste trabalho, adotou-se a temperatura de controle do termostato, para o verão, de 24°C e para o inverno de 22°C.

### 2.4.2. Arquivo Climático

Para a simulação do consumo energético anual de uma edificação, incluindo os sistemas de climatização, iluminação e equipamentos elétricos, utilizam-se dados meteorológicos obtidos para a localidade abordada. Os dados meteorológicos são coletados por um período igual ou superior a 10 anos, e entre eles, a título de exemplo, podemos citar: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura de orvalho, umidade relativa, conteúdo de umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, índice de nebulosidade do céu e radiação solar.

Para as simulações deste trabalho, utilizou-se o arquivo climático da cidade de Porto Alegre obtido através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE, 2011. O arquivo é apresentado no formato *EPW (EnergyPlus Weather)*, sendo próprio para a utilização no programa *EnergyPlus*.

### 2.4.3. Cronograma de Utilização e Ocupação do Prédio

Para a simulação computacional no *EnergyPlus*, faz-se necessária a criação de um perfil horário de ocupação e utilização do prédio. Neste perfil, configuram-se os períodos de ocupação do prédio por pessoas, de utilização dos equipamentos, de uso da iluminação interna e o uso do equipamento de ar condicionado. No programa, esta configuração se dá de forma numérica, sendo atribuído 0 (zero) para o valor mínimo, e 1 (um) para o valor máximo. Essa configuração é feita para todos os dias da semana, durante as 24 horas, estabelecendo-se exceções para fins de semanas e feriados.

### 2.4.4. Dados de Saída

O programa *EnergyPlus* pode gerar diferentes dados de saída, sendo estes definidos pelo usuário de acordo com sua necessidade, contendo os resultados das simulações realizadas com o modelo proposto. O programa é ainda capaz de gerar relatórios de consumo mensal e anual de toda a edificação, assim como o consumo individual dos sistemas presentes.

Nas simulações deste trabalho, foram solicitados os relatórios necessários para o dimensionamento do novo sistema de ar condicionado, sendo eles: a potência de refrigeração e aquecimento, a vazão de ar e a temperatura.

Para análise do consumo energético, foram solicitados os relatórios referente ao consumo de toda a edificação, assim como consumos individuais do sistema de climatização, iluminação interna e externa e equipamentos.

## 3. BALANÇO DE ENERGIA DA ZONA TÉRMICA

A teoria apresentada é resultado da compilação das informações obtidas nos manuais do programa *EnergyPlus* [2011].

### 3.1. EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA DA ZONA TÉRMICA

O balanço de energia da zona térmica em regime transiente é descrito pela expressão 3.1, assumindo a zona térmica como um único volume de controle, no qual são aplicadas as parcelas de energia participantes.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} A_{si} (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.1)$$

Onde:

$T_z$  é a temperatura média do ar da zona, [°C];

$T_{zi}$  é a temperatura média do ar da zona i ou zona adjacente, [°C];

$T_{si}$  é a temperatura da superfície i da zona, [°C];

$T_{\infty}$  é a temperatura ambiente do ar exterior, [°C];

$C_z$  é a capacitância térmica do ar da zona, [J/K];

$c_p$  é o calor específico do ar, [J/kg.K];

$h_{c,si}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície  $i$  da zona, [W/m<sup>2</sup>.K];

$A_{si}$  é a área da superfície  $i$  da zona, [m<sup>2</sup>];

$\dot{m}_i$  é a vazão mássica de ar da zona  $i$  ou zona adjacente, [kg/s];

$\dot{m}_{inf}$  é a vazão mássica do ar de infiltração na zona, [kg/s];

$\sum_{i=1}^{N_{zi}} \dot{Q}_i$  é a potência térmica das fontes internas de calor transferida por convecção para a zona, [W];

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{h,si} A_{si} (T_{si} - T_z)$  é a potência térmica transferida por convecção das superfícies das zonas, [W];

$\dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z)$  é a taxa de calor devido à infiltração do ar externo na zona, [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$  é a potência térmica devido à troca de infiltrações entre as zonas, [W];

$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} c_p (T_{sup} - T_z)$  é a potência fornecida pelo ar condicionado para atender a carga térmica da zona, [W];

$\dot{m}_{sys}$  é a vazão mássica de ar fornecida pelo sistema de ar-condicionado à zona, [kg/s];

$T_{sup}$  é a temperatura de insulfamento do ar fornecido pelo sistema de ar-condicionado à zona, [°C];

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a taxa de energia armazenada no ar da zona [W].

### 3.2. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA POR CONDUÇÃO

No *EnergyPlus*, a análise do comportamento térmico dinâmico dos elementos de construção da edificação incluem fatores de resposta, coeficientes de transferência de calor ou fatores de resposta periódicos, os quais são calculados pelo algoritmo do programa, conforme descrito pela expressão 3.2

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (3.2)$$

Onde:

$q''_{ko}(t)$  é o fluxo de calor por condução do exterior através do elemento construtivo, [W/m<sup>2</sup>]

$T$  é a temperatura da superfície do elemento construtivo, [°C];

$i$  é o sub-índice que significa o lado interno do elemento construtivo;

$o$  é o sub-índice que significa o lado externo do elemento construtivo;

$t$  é o passo de tempo atual, [S];

$X, Y$  são os fatores de resposta.

### 3.3. BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE EXTERNA DA ZONA TÉRMICA

O balanço de energia na superfície externa da zona térmica é definido pela soma das parcelas de energia por convecção, radiação e condução na face externa da superfície, conforme descrito pela expressão 3.3.

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3.3)$$

Onde:

$q''_{asol}$  é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{LWR}$  é o fluxo líquido de energia radiante trocado com o meio e as superfícies no entorno [W/m<sup>2</sup>]

$q''_{conv}$  é o fluxo de calor por convecção trocado entre a superfície e ar externo, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{ko}$  é o fluxo de calor por condução na face externa da parede.

### 3.4. BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE INTERNA DA ZONA TÉRMICA

É modelado como a soma de quatro parcelas de transferência de calor: 1) condução através do elemento construtivo da edificação, 2) convecção para o ar, 3) radiação térmica absorvida e refletida e 4) radiação térmica trocada entre as superfícies, descrito pela expressão 3.4.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv,z} = 0 \quad (3.4)$$

Onde:

$q''_{LWX}$  é o fluxo líquido de energia por radiação trocado entre as superfícies, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{SW}$  é o fluxo líquido de energia por radiação da iluminação para as superfícies, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{LWS}$  é o fluxo de energia por radiação dos equipamentos da zona térmica, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{ki}$  é o fluxo de calor por condução na face interna da parede, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{sol}$  é o fluxo de energia por radiação solar transmitida, absorvida pela superfície, [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{conv,z}$  é o fluxo de calor por convecção do ar da zona, [W/m<sup>2</sup>].

## 4. A EDIFICAÇÃO

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o projeto arquitetônico de uma edificação comercial a ser construída na cidade de Porto Alegre, RS. A edificação contará com uma torre de 13 (treze) pavimentos, sendo o térreo, primeiro e segundo pavimentos referentes a área de eventos, a qual será climatizada independentemente aos pavimentos de escritório (pavimentos típicos). A cobertura da edificação contará ainda com um restaurante, tendo este fechamento por pele de vidros, para vista panorâmica. Na Figura 4.1 pode ser observado o complexo comercial, juntamente com a torre de escritórios e restaurante ser construída.



Figura 4.1 – Projeto arquitetônico do complexo comercial a ser construído.

### 4.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Os elementos construtivos que compõem o projeto arquitetônico da edificação são mostrados na Tabela 4.1, assim como suas principais propriedades termofísicas.

Tabela 4.1 – Caracterização das construções que constituem a edificação.

| Construção     | Camada        | Material         | L (mm) | K (W/m.K) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | R (m <sup>2</sup> .K/W) |
|----------------|---------------|------------------|--------|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| Parede Externa | Interna       | Gesso Acartonado | 15     | 0,4       | 800                         | 0,0375                  |
|                | Intermediária | Lã de Rocha      | 90     | 0,04      | 8                           | 2,25                    |
|                | Externa       | Concreto         | 300    | 1,2658    | 2242                        | 0,237                   |
| Parede Interna | Interna       | Gesso Acartonado | 15     | 0,4       | 800                         | 0,0375                  |
|                | Intermediária | Lã de Rocha      | 70     | 0,04      | 8                           | 1,75                    |
|                | Externa       | Gesso Acartonado | 15     | 0,4       | 800                         | 0,0375                  |

|               |                 |                |      |        |      |         |
|---------------|-----------------|----------------|------|--------|------|---------|
| Piso Externo  | Interna         | Forro de Gesso | 12,5 | 0,4    | 800  | 0,03125 |
|               | Intermediária 1 | Ar             | 130  | -      | -    | 2,4039  |
|               | Intermediária 2 | Concreto       | 150  | 1,2658 | 2242 | 0,1185  |
|               | Intermediária 3 | Contrapiso     | 100  | 0,7194 | 1922 | 0,139   |
|               | Externa         | Basalto        | 25   | 3,17   | 2560 | 0,0078  |
| Piso Interno  | Interna         | Forro de Gesso | 12,5 | 0,4    | 800  | 0,03125 |
|               | Intermediária 1 | Ar             | 130  | -      | -    | 2,4039  |
|               | Intermediária 2 | Concreto       | 150  | 1,2658 | 2242 | 0,1185  |
|               | Externa         | Contrapiso     | 100  | 0,7194 | 1922 | 0,139   |
| Forro Interno | Interna         | Contrapiso     | 100  | 0,7194 | 1922 | 0,139   |
|               | Intermediária 1 | Concreto       | 150  | 1,2658 | 2242 | 0,1185  |
|               | Intermediária 2 | Ar             | 130  | -      | -    | 2,4039  |
|               | Externa         | Forro de Gesso | 12,5 | 0,4    | 800  | 0,03125 |
| Janelas       | Externa         | Clear          | 6    | 0,9    | -    | -       |

onde L é a espessura do material, K a condutividade térmica do material,  $\rho$  é a massa específica do material e R a resistência térmica do material.

## 4.2. CARGAS INTERNAS

As fontes internas geradoras de calor e umidade liberados no ambiente, são atribuídas às pessoas, equipamentos elétricos, iluminação interna e renovação de ar.

### 4.2.1. Equipamentos elétricos

Os equipamentos elétricos acrescentam carga térmica ao ambiente devido a dissipação de calor. Em prédios de escritórios, os equipamentos elétricos mais usuais são computadores, monitores, impressoras, cafeteiras e bebedouros refrigerados.

Consultando-se as plantas da arquitetura de interiores, verificou-se a quantidade dos mesmos conforme os postos de trabalho. As taxas típicas de dissipação de calor de equipamentos considerada seguem as recomendações da NBR 16401 - 2008, e podem ser verificadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Taxas de dissipação de calor de equipamentos (NBR 16401 - 2008).

| Equipamentos                     | Taxas de Dissipação (W) |
|----------------------------------|-------------------------|
| Computador                       | 55                      |
| Monitor CRT (13pol. a 15 pol.)   | 55                      |
| Impressora a laser de escritório | 320                     |
| Cafeteira                        | 1500                    |
| Bebedouros refrigerados          | 350                     |



#### 4.2.2. Pessoas

Para a determinação da quantidade de pessoas locadas em cada ambiente, foram utilizadas plantas da arquitetura de interiores, onde se pode observar a ocupação dos postos de trabalho.

#### 4.2.3. Iluminação Interna

A taxa de iluminação interna seguiu as recomendações da NBR 16401 - 2008, que estabelece para escritórios, um valor 16 W/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.4. Renovação de ar

A taxa de renovação de ar seguiu as recomendações da NBR 16401 - 2008, que estabelece para escritórios, conforme o nível intermediário, um valor igual a 3,1 L/s por pessoa, e 0,4 L/s por m<sup>2</sup> do recinto.

### 5. CLIMATIZAÇÃO PREVISTA NO PROJETO BASE

Para a edificação a ser construída, optou-se pelo sistema por expansão indireta (água gelada). O sistema como um todo é resumidamente composto por *chillers* de condensação a ar, evaporadoras do tipo fan-coil, bombas hidráulicas centrífugas, assim como rede de distribuição do ar composta por dutos e difusores.

De forma a se obter uma simulação computacional mais próxima da realidade quanto possível, foram levantados dados dos equipamentos previstos no Projeto Base de climatização a ser implantado, inclusos os valores referentes as bombas centrífugas, ventiladores e resistências do sistema, assim como dos *chillers* previstos em projeto. Para a simulação no *EnergyPlus*, utilizou-se o modelo de *chiller* com maior semelhança ao ser implantado, corrigindo suas capacidades de operação e refrigeração. Uma vez que o programa não possibilita a seleção de *chillers* com modo de operação por ciclo reverso, foi selecionado um sistema de aquecimento em separado, sendo o mesmo composto por um boiler elétrico, o qual, quando solicitado, fornecerá a carga de aquecimento ao sistema.

Tabela 5.1 – Equipamentos previstos no Projeto Base.

| Equipamento         | Local            | Quant. | Capacidade de Refrigeração (W) | Capacidade de Aquecimento (W) | COP Nominal de Refrigeração (W/W) |
|---------------------|------------------|--------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Chiller a Ar</i> | Central Térmica  | 2      | 806.000                        | -                             | 3,10                              |
| <i>Chiller a Ar</i> | Central Térmica  | 1      | 246.000                        | -                             | 2,68                              |
| Equipamento         | Local            | Quant. | Recalque (mca)                 | Vazão (m <sup>3</sup> /h)     |                                   |
| Bomba Primária      | Central Térmica  | 2      | 10                             | 45                            |                                   |
| Bomba Primária      | Central Térmica  | 1      | 10                             | 130                           |                                   |
| Bomba Secundária    | Central Térmica  | 2      | 25                             | 130                           |                                   |
| Fancoil             | Pavimento Típico | 4      | -                              | 8.600                         |                                   |

## 5.1. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROJETO BASE

Uma vez levantadas as características acerca do Projeto Base da edificação, as mesmas foram inseridas e simuladas no programa *EnergyPlus*, de forma a se obter os valores referentes ao consumo de energia elétrica. Verificou-se que para o Projeto Base da edificação, o consumo de energia elétrica é de 1.341.918 kW.h/ano.

Conforme os valores obtidos na simulação, a maior parcela no gasto de energia elétrica do Projeto Base é a refrigeração, com 446.058 kW.h/ano, seguido pelos equipamentos internos, com 393.523 kW.h/ano e a iluminação, com 302.165 kW.h/ano.

## 5.2. ALTERAÇÕES DE PROJETO PROPOSTAS

Com o intuito de reduzir os gastos com energia elétrica previstos no Projeto Base, foram propostas alterações de projeto, conforme descritas a seguir.

### 5.3. Implantação de Sistema de Climatização por Expansão Direta com Fluxo de Refrigerante Variável (VRF).

Para a proposição alternativa ao Projeto Base, optou-se pela utilização de sistema por expansão direta com fluxo de refrigerante variável (VRF) como substituto ao sistema por expansão indireta (Água Gelada) proposto no Projeto Base.

#### 5.3.1. Definição

O sistema VRF, conforme ABNT, 2008, é constituído por um conjunto de unidades de ar de expansão direta, instaladas dentro dos ambientes aos quais servem, controladas e operadas independentemente umas das outras, que são supridas por fluido refrigerante em vazão variável por uma unidade condensadora central, instalada externamente.

#### 5.3.2. Aspectos Considerados para a Implantação do Sistema VRF

Alguns aspectos foram consideração para que o sistema fosse adotado, entre eles:

- Sistema eficiente (Carotenuto, 2009);
- Sistema compacto, possibilitando a implantação das unidades condensadoras na cobertura da edificação;
- Possibilidade de subdivisão e utilização de unidades condensadoras individuais por pavimento da edificação;
- Ausência de bombas hidráulicas centrífugas para deslocamento de fluido pelo sistema;
- Baixo ruído de operação, aliada a capacidade de instalação das unidades condensadoras afastadas das construções vizinhas, reduzindo a possibilidade de futuras indisposições com a vizinhança.

#### 5.3.3. Dimensionamento do Sistema

Para o dimensionamento do novo sistema de climatização, inicialmente se realizou a simulação computacional do sistema utilizando o *EnergyPlus* para obtenção das máximas potências de refrigeração e aquecimento necessárias a cada zona térmica. Esta etapa foi desenvolvida deixando os parâmetros de entrada relacionados ao sistema em *autosize*, permitindo que o programa dimensione as capacidades das máquinas necessárias.

Uma vez estimadas as capacidades de refrigeração e aquecimento necessárias ao sistema pela simulação, selecionou-se as unidades condensadoras e evaporadoras utilizando

como suporte o manual técnico fornecido pelo fabricante do equipamento (Carrier) para obtenção dos dados necessários para dimensionamento.

#### 5.4. Controle da Iluminação Interna

De forma a se obter uma redução no consumo de energia elétrica da edificação, tratando-se de uma construção com elevada área coberta por vidros, optou-se pela utilização de um controle de iluminação interna. Para a simulação do consumo no *EnergyPlus*, foram declarados dois sensores controladores de iluminação por zona térmica. Para cada espaço de tempo, o programa calcula o quanto de iluminação natural está adentrando no interior da zona e determina o quanto da iluminação elétrica pode ser reduzida, utilizando como iluminação interna na zona, um misto de luz natural e luz elétrica (*EnergyPlus*, 2011).

Os sensores controladores foram configurados em todas as zonas térmicas constantes nos dez pavimentos típicos da edificação, assim como no restaurante constante na cobertura.

#### 5.5. COMPARAÇÕES ENTRE OS PROJETOS BASE E PROPOSTO

Pode-se observar as evoluções do consumo de energia elétrica mensal, em kW.h, obtidos para o Projeto Base e o Projeto Proposto da edificação, conforme é mostrado nos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2. As retas que interligam os consumos mensais por uso final, que representa o consumo total do sistema de climatização (HVAC), abrange os valores de consumo de energia com refrigeração, aquecimento, ventiladores e bombas. A soma dos consumos de energia elétrica com iluminação interna e equipamentos, é representada pelas retas intituladas Edificação. Já o consumo de energia elétrica total da edificação é representado pelas retas intituladas HVAC+Edificação.

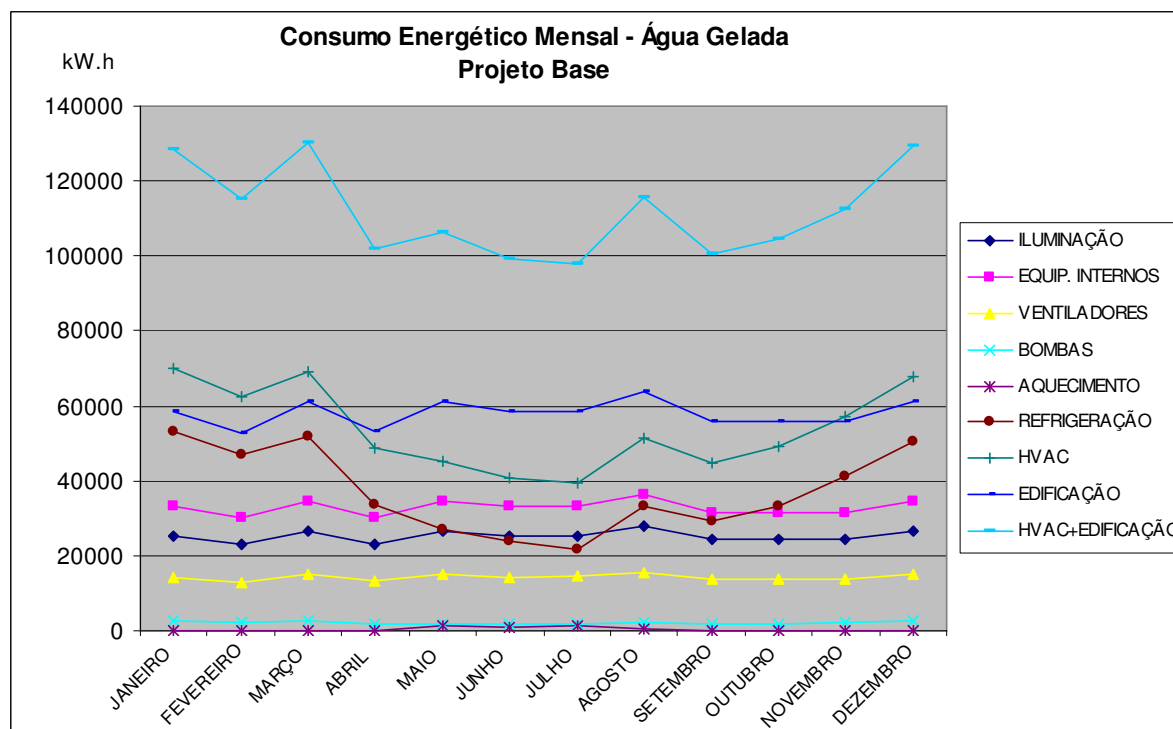


Figura 5.1 – Consumo energético mensal do Projeto Base.

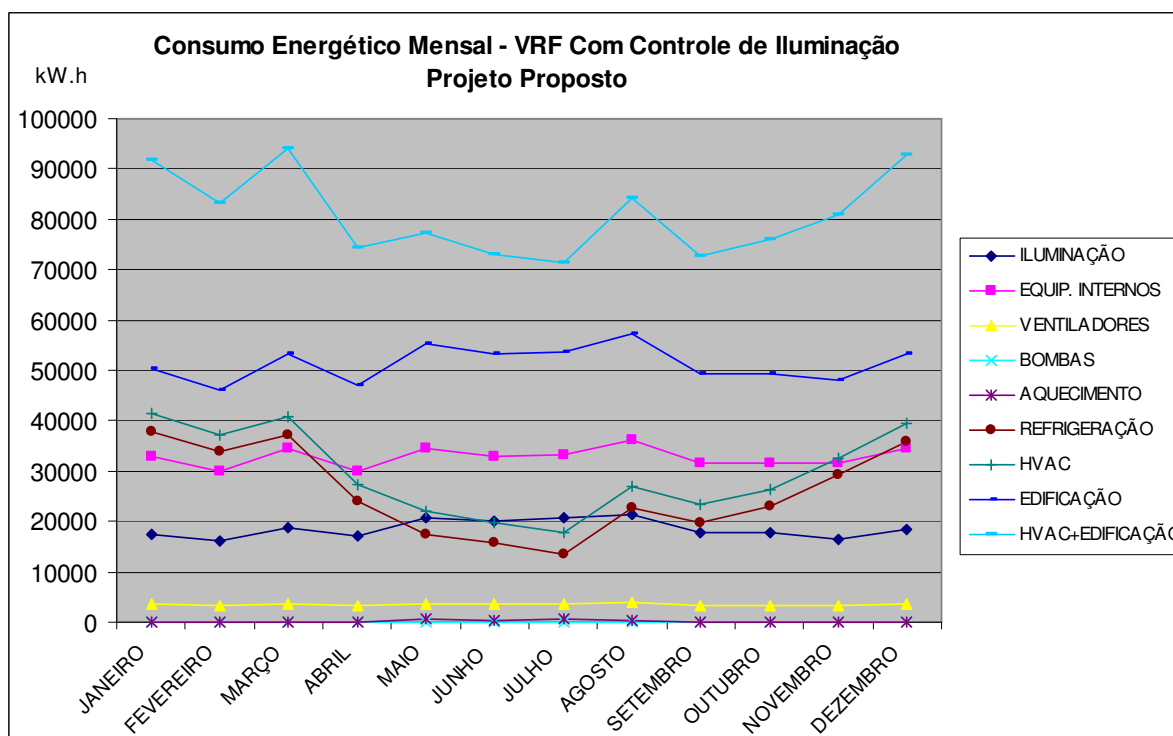


Figura 5.2 – Consumo energético mensal do Projeto Proposto.

Em análise as evoluções dos consumos de energia elétrica ilustradas nas Figuras 5.1 e 5.2, identifica-se uma considerável variação no consumo de energia elétrica total da edificação, representadas pelas retas HVAC+Edificação. A redução do consumo de energia elétrica total da edificação, observada com as alterações do Projeto Base para o Projeto Proposto, foi de 27,6%. A redução do consumo de energia elétrica da edificação, representadas pelas retas Edificação, entre o Projeto Base e o Projeto Proposto, foi de 11,4%. Esta diminuição se deve a redução do consumo de energia elétrica com iluminação devido ao controle de iluminação interna proposto. Já a redução do consumo de energia elétrica pelo sistema de climatização (HVAC), entre o Projeto Base e Projeto Proposto, foi da ordem de 45,0%. Esta diminuição se deve ao fato do sistema de refrigeração por fluxo de refrigerante variável (VRF) não utilizar bombas centrífugas, como ocorre no sistema por expansão indireta com água gelada, ao menor consumo de energia elétrica pelos ventiladores do Projeto Proposto, e além disso, devido ao aquecimento do sistema de climatização, onde no sistema de água gelada, é feito por resistências elétricas. Ainda influencia para esta redução, a diminuição da carga térmica nos ambientes climatizados, devido a redução da utilização da iluminação interna, devido ao controle de iluminação interna proposto. O gráfico da Figura 5.3 ilustra esta análise, representando os consumos elétricos anuais para ambos os projetos.

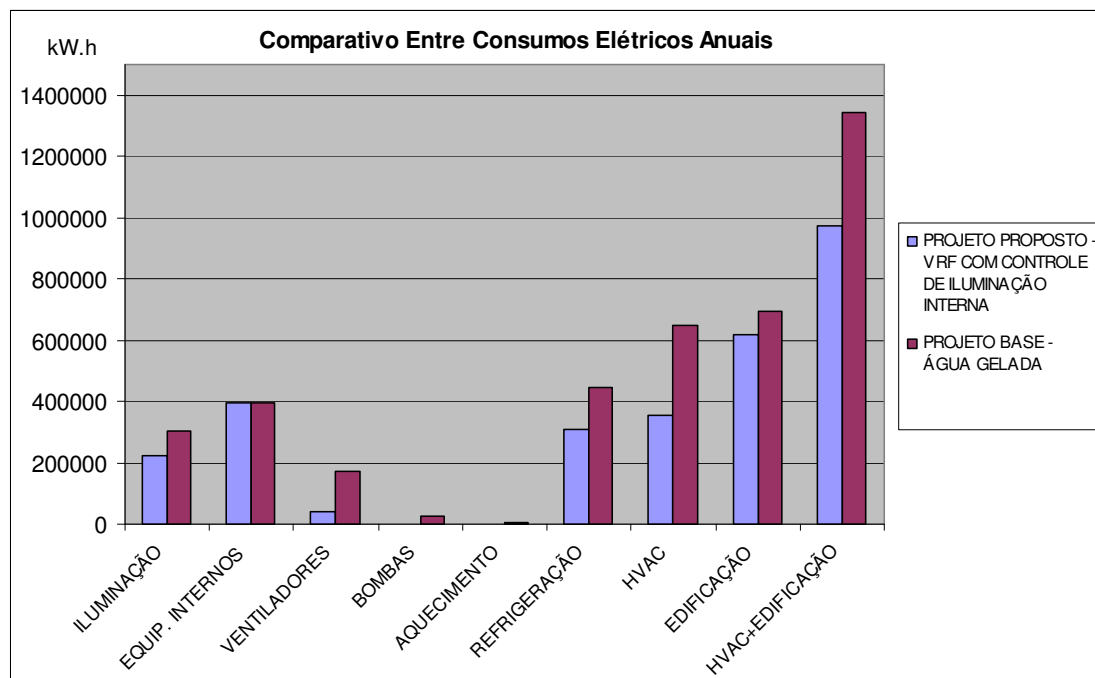


Figura 5.3 – Comparativo entre consumos elétricos anuais para ambos os projetos.

Tomando-se como base a tarifa da energia elétrica de R\$ 0,336980 / kW.h, praticado na cidade de Porto Alegre, referente ao mês de Dezembro, para edificações do tipo comercial, conforme CEEE, Dezembro de 2011, pode-se estipular os custos mensais e anuais para ambos os projetos, conforme ilustrado nos gráficos das Figuras 5.4 e 5.5 a seguir.

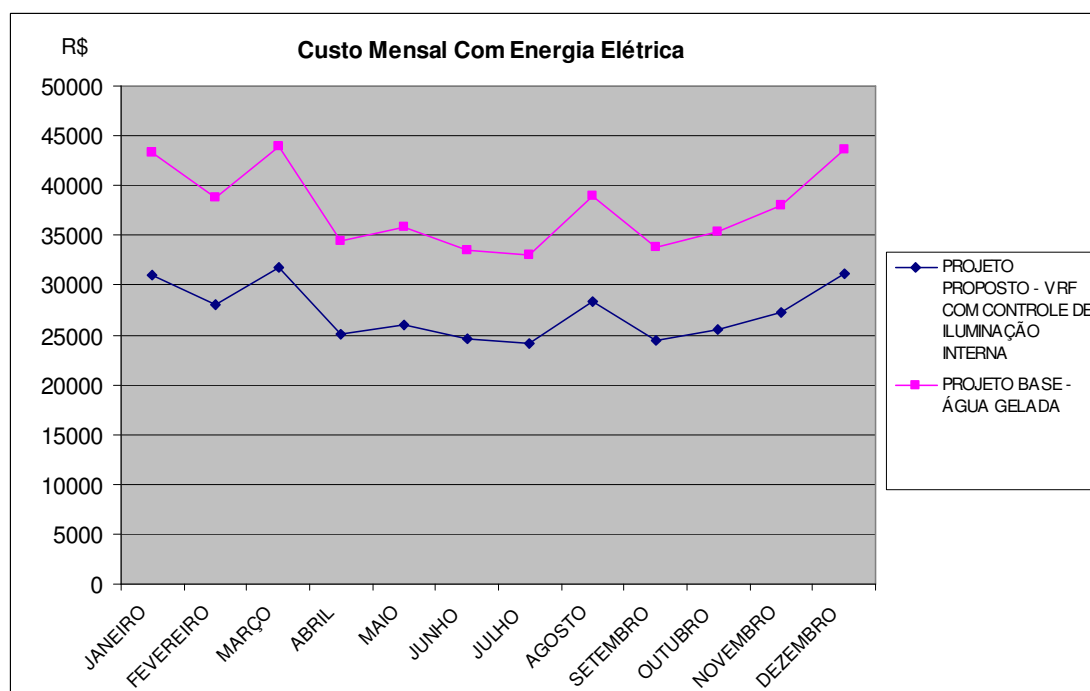


Figura 5.4 – Custo mensal com energia elétrica para ambos os projetos.

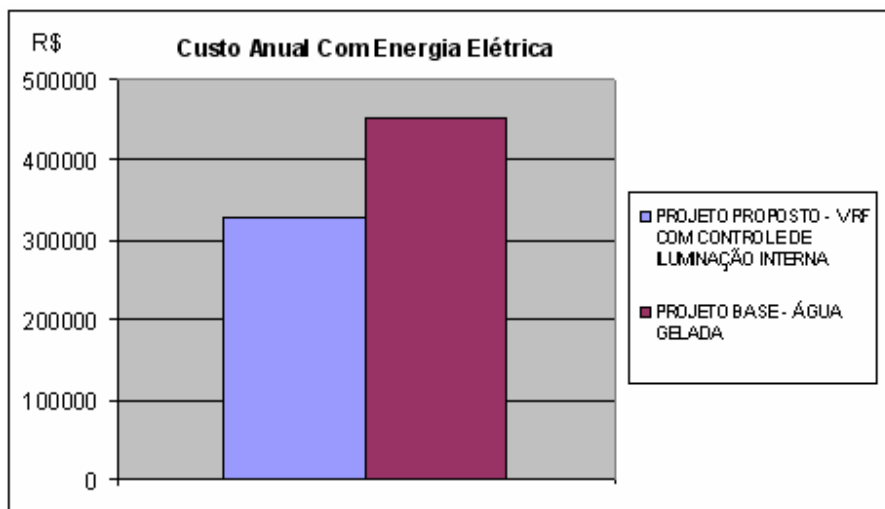


Figura 5.5 – Custo anual com energia elétrica para ambos os projetos.

É possível observar pela análise do gráfico da Figura 5.4, que o gasto mensal com energia elétrica é mais elevado para o Projeto Base que para o Projeto Proposto. Conforme citado anteriormente, este consumo mais elevado se deve ao fato do Projeto Base possuir gastos mais elevados com bombas centrífugas, ventiladores, aquecimento do sistema de climatização por resistências elétricas, e ausência no controle da iluminação interna da edificação, sendo menos eficiente termo-energéticamente. Em análise ao gráfico da Figura 5.5, é possível verificar os diferentes custos anuais para os projetos, respondendo o Projeto Base por um custo anual de R\$ 452.199,00 e o Projeto Proposto por um custo de R\$ 327.308,00.

## 6. CONCLUSÕES

Pode-se verificar que por meio de alterações do sistema de climatização, configurações de sensores e controles de iluminação interna para aproveitamento da luz natural, assim como pequenas alterações arquitetônicas de forma a absorver estas modificações, torna-se possível otimizar a eficiência térmica e energética de uma edificação significativamente. Verifica-se que é possível obter uma redução significativa no consumo de energia elétrica, reduzindo o desperdício e os custos com energia elétrica.

Os resultados alcançados neste trabalho estão coerentes com os resultados obtidos nos trabalhos de Carotenuto, 2009 e Stein, 2011. A utilização do *EnergyPlus* para a realização de simulações com base nos parâmetros que definem a edificação, assim dados característicos dos diferentes equipamentos fornecidos pelo fabricante, permitiram o dimensionamento dos sistemas de climatização, o mais próximo da realidade, tanto para o Projeto Base quanto para o Projeto Proposto para a edificação a ser construída.

Verificou-se que a possibilidade de utilização de programas computacionais de simulação energética como o *EnergyPlus* se mostra como uma grande ferramenta na previsão do comportamento termo-energético de uma edificação, a partir da influência dos mais diferentes fatores, mostrando-se como um forte aliado na tomada de decisões.

Isto posto, conclui-se que, através de alterações do sistema de climatização e controle de iluminação interna da edificação, torna-se possível uma significativa redução no consumo de energia elétrica de uma edificação, diminuindo assim, o consumo dos meios naturais disponíveis, o impacto ambiental e o custo operacional de uma edificação.

O presente trabalho não analisou os custos necessários para a implantação tanto do Projeto Base quanto do Projeto Proposto, assim como uma análise de viabilidade econômica e

retorno do investimento para ambas as propostas. Desta forma, fica como sugestão para futuros trabalhos, o levantamento dos custos referentes a implantação dos sistemas de climatização, assim como quaisquer intervenções e modificação, de forma a verificar a viabilidade econômica dos diferentes tipos de sistemas e configurações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT; “**NBR 16401: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

ASHRAE, 2001a. “**Chapter 27- Climatic Design Information**”, ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

ASHRAE, 2005c. “**Chapter 28- Climatic Design Information**”, ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.

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 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CARRIER; “**SMMS Super Modular Multi System – Manual de Projeto**”, ED MP SMMSi - A - 02.11, CARRIER A United Technologies Company, Japan, 2011

CEEE; “**Tabela de tarifas e custos de serviços ao consumidor**”, <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/Taxas%20e%20servicos%20outubro%202012.pdf> Acessado em 08/12/2012.

EnergyPlus; “**EnergyPlus Engineering Document – The Reference to EnergyPlus Calculation**”, Version 6.0, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2011.

LABEE; “**Arquivos Climáticos**”, <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acessado em 20/08/2011.

Manual de Eficiência Energética, 2010, disponível em:  
<http://www.besdportugal.org/content/index.php?action=articlesDetailFo&rec=272>

STEIN, T. S. “**Impacto das Soluções de Arquitetura e Climatização no Consumo de Energia de uma Edificação**”. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

Strand, R. et al., 1999. “**Enhancing and Extending the Capabilities of the Building Heat Balance Simulation Technique in EnergyPlus**”, In Proceedings of Building Simulation’99 – IBPSA International Conference, September 1999, Kyoto, Japan.

## APÊNDICE A – CENTRAL TÉRMICA DO PROJETO BASE

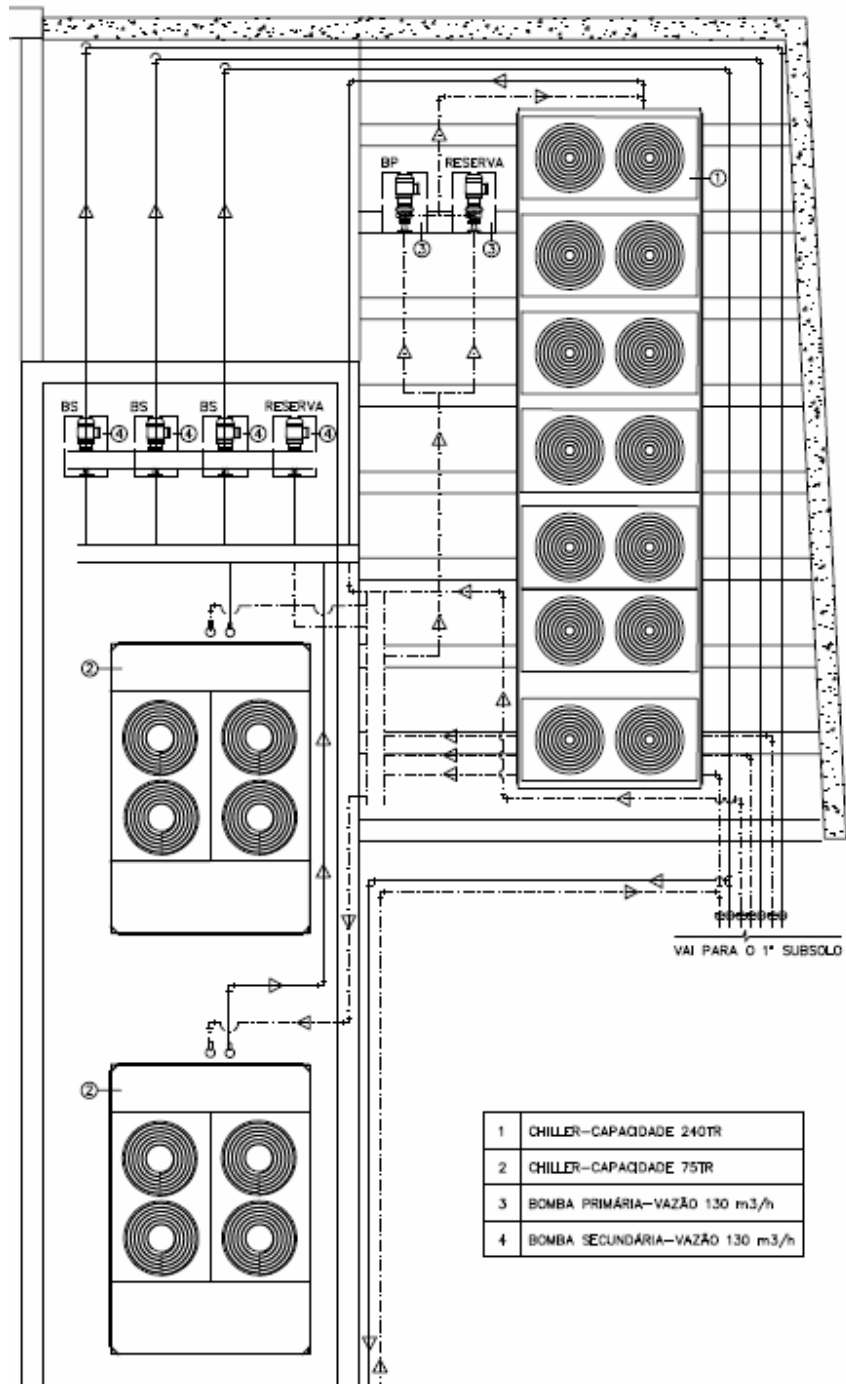


Figura A.1 – Instalações da central térmica de climatização por água gelada, prevista no Projeto Base, ao nível do pavimento térreo da edificação.



## APÊNDICE B – LOCAÇÃO DAS UNIDADES CONDENSADORAS POR VRF

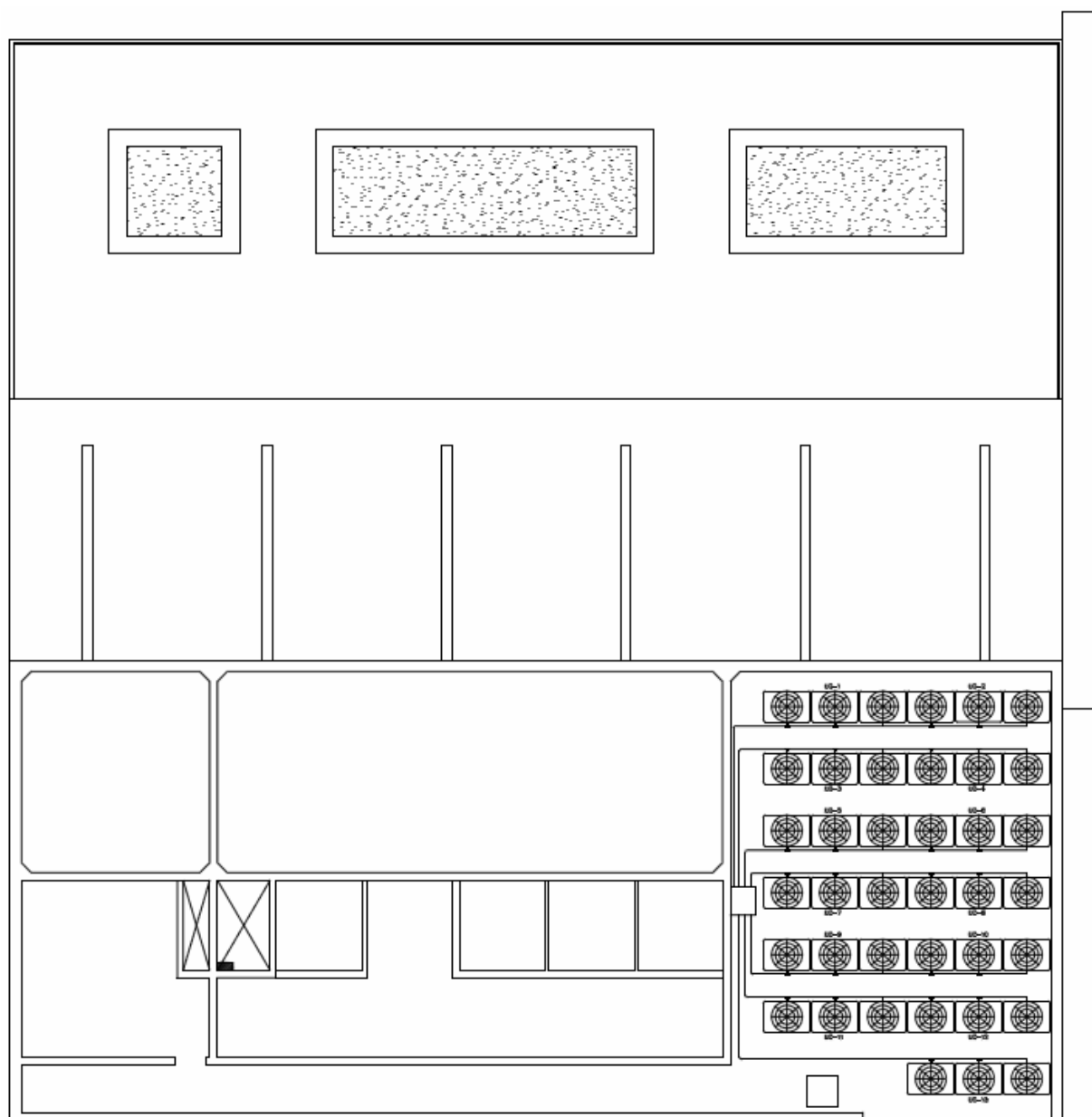


Figura B.1 – Possível locação das unidades condensadoras por VRF, previstas no Projeto Proposto, na cobertura da edificação.

## APÊNDICE C – LOCAÇÃO DAS UNIDADES EVAPORADORAS POR VRF

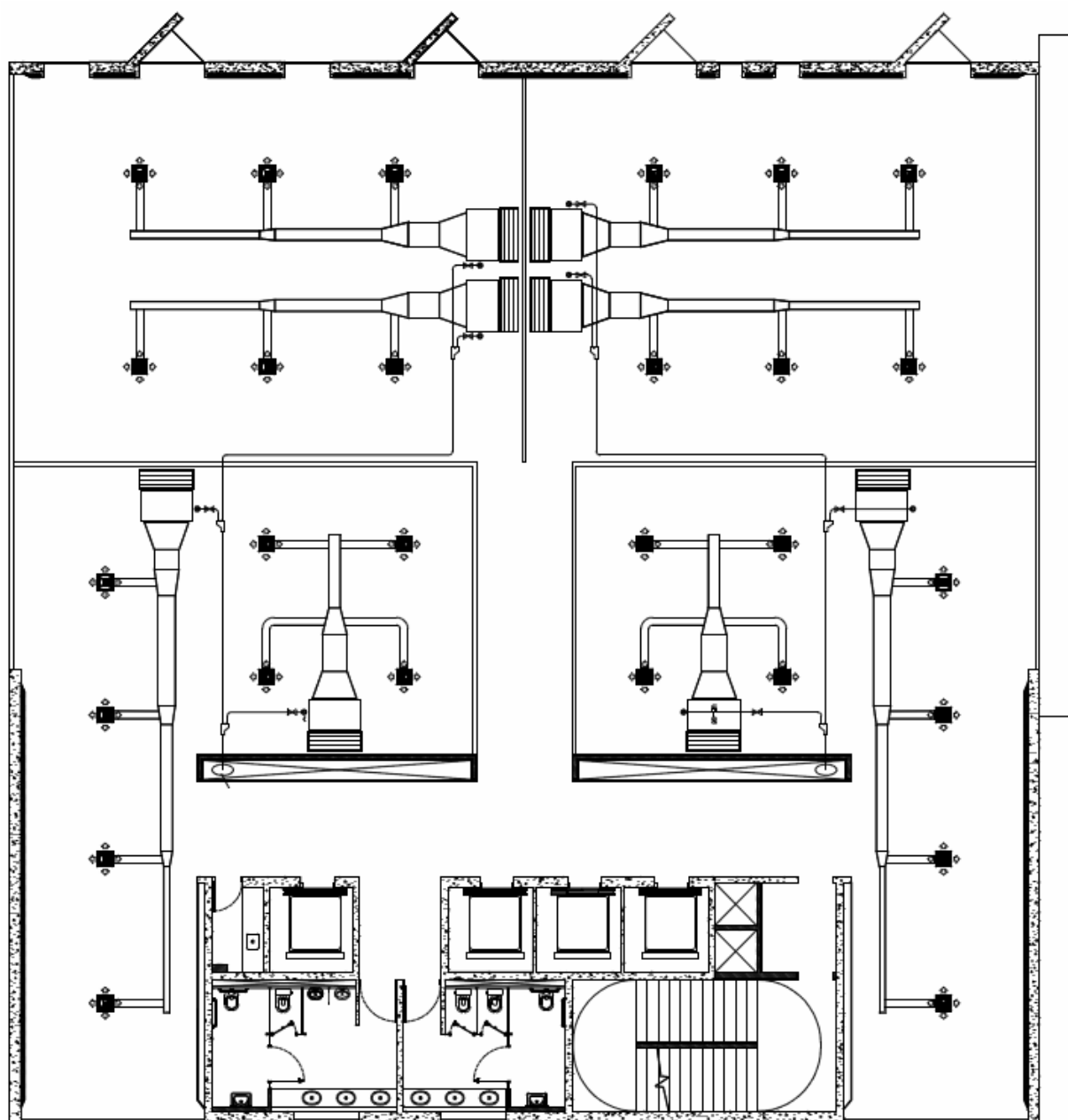


Figura C.1 – Exemplificação de uma possível locação das unidades evaporadoras por VRF, previstas no Projeto Proposto, em um pavimento típico.

APÊNDICE D – RELATÓRIO GERADO PELO *HOURLY ANALYSIS PROGRAM*

| <b>Air System Sizing Summary for TIPO (TCC)</b> |                                    | 12/10/2012<br>01:51                  |                             |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Project Name: CDL - TCC                         |                                    |                                      |                             |
| <b>Air System Information</b>                   |                                    |                                      |                             |
| Air System Name .....                           | <b>TIPO (TCC)</b>                  | Number of zones .....                | <b>1</b>                    |
| Equipment Class .....                           | <b>SPLT AHU</b>                    | Floor Area .....                     | <b>570,0 m<sup>2</sup></b>  |
| Air System Type .....                           | <b>SZCAV</b>                       | Location .....                       | <b>Porto Alegre, Brazil</b> |
| <b>Sizing Calculation Information</b>           |                                    |                                      |                             |
| <b>Zone and Space Sizing Method:</b>            |                                    |                                      |                             |
| Zone L/s .....                                  | <b>Sum of space airflow rates</b>  | Calculation Months .....             | <b>Jan to Dec</b>           |
| Space L/s .....                                 | <b>Individual peak space loads</b> | Sizing Data .....                    | <b>Calculated</b>           |
| <b>Central Cooling Coil Sizing Data</b>         |                                    |                                      |                             |
| Total coil load .....                           | <b>83,5 kW</b>                     | Load occurs at .....                 | <b>Jan 1500</b>             |
| Sensible coil load .....                        | <b>73,4 kW</b>                     | OA DB / WB .....                     | <b>42,0 / 24,0 °C</b>       |
| Coil L/s at Jan 1500 .....                      | <b>4899 L/s</b>                    | Entering DB / WB .....               | <b>26,9 / 18,7 °C</b>       |
| Max block L/s .....                             | <b>4899 L/s</b>                    | Leaving DB / WB .....                | <b>14,4 / 13,7 °C</b>       |
| Sum of peak zone L/s .....                      | <b>4899 L/s</b>                    | Coil ADP .....                       | <b>13,1 °C</b>              |
| Sensible heat ratio .....                       | <b>0,880</b>                       | Bypass Factor .....                  | <b>0,100</b>                |
| m <sup>2</sup> /kW .....                        | <b>6,8</b>                         | Resulting RH .....                   | <b>51 %</b>                 |
| W/m <sup>2</sup> .....                          | <b>146,4</b>                       | Design supply temp. ....             | <b>14,4 °C</b>              |
| Water flow @ 5,6 °K rise .....                  | <b>N/A</b>                         | Zone T-stat Check .....              | <b>0 of 1 OK</b>            |
|   |                                    | Max zone temperature deviation ..... | <b>0,3 °K</b>               |
| <b>Central Heating Coil Sizing Data</b>         |                                    |                                      |                             |
| Max coil load .....                             | <b>25,3 kW</b>                     | Load occurs at .....                 | <b>Des Htg</b>              |
| Coil L/s at Des Htg .....                       | <b>4899 L/s</b>                    | W/m <sup>2</sup> .....               | <b>44,3</b>                 |
| Max coil L/s .....                              | <b>4899 L/s</b>                    | Ent. DB / Lvg DB .....               | <b>19,3 / 23,6 °C</b>       |
| Water flow @ 11,1 °K drop .....                 | <b>N/A</b>                         |                                      |                             |
| <b>Supply Fan Sizing Data</b>                   |                                    |                                      |                             |
| Actual max L/s .....                            | <b>4899 L/s</b>                    | Fan motor BHP .....                  | <b>0,00 BHP</b>             |
| Standard L/s .....                              | <b>4897 L/s</b>                    | Fan motor kW .....                   | <b>0,00 kW</b>              |
| Actual max L/(s-m <sup>2</sup> ) .....          | <b>8,59 L/(s-m<sup>2</sup>)</b>    | Fan static .....                     | <b>0 Pa</b>                 |
| <b>Outdoor Ventilation Air Data</b>             |                                    |                                      |                             |
| Design airflow L/s .....                        | <b>538 L/s</b>                     | L/s/person .....                     | <b>5,38 L/s/person</b>      |
| L/(s-m <sup>2</sup> ) .....                     | <b>0,94 L/(s-m<sup>2</sup>)</b>    |                                      |                             |

Figura D.1 – Relatório gerado pelo programa *Hourly Analysis Program*, para estimativa das capacidades térmicas e vazões necessárias para climatização das zonas térmicas.

## APÊNDICE E – TABELA DOS RENDIMENTOS E CAPACIDADES DE REFRIGERAÇÃO DAS CONDENSADORAS POR VRF

PRUMADA NORTE – MMY–AP46141HT5

PAVIMENTO – COMP. EQUIVALENTE – ALTURA – RENDIMENTO – CAPACIDADE

|     |       |       |       |          |
|-----|-------|-------|-------|----------|
| 12ª | 43m   | 9m    | 90%   | 121,5kW  |
| 11ª | 47,5m | 13,5m | 90%   | 121,5kW  |
| 10ª | 52m   | 18m   | 90%   | 121,5kW  |
| 9ª  | 56,5m | 22,5m | 87,5% | 113,75kW |
| 8ª  | 61m   | 27m   | 87,5% | 113,75kW |
| 7ª  | 65,5m | 31,5m | 87,5% | 113,75kW |
| 6ª  | 70m   | 36m   | 85%   | 110,5kW  |
| 5ª  | 74,5m | 40,5m | 85%   | 110,5kW  |
| 4ª  | 79m   | 45m   | 82,5% | 107,25kW |
| 3ª  | 83,5m | 49,5m | 82,5% | 107,25kW |

PRUMADA SUL – MMY–AP46141HT5

PAVIMENTO – COMP. EQUIVALENTE – ALTURA – RENDIMENTO – CAPACIDADE

|     |       |       |       |          |
|-----|-------|-------|-------|----------|
| 12ª | 52m   | 9m    | 87,5% | 113,75kW |
| 11ª | 56,5m | 13,5m | 87,5% | 113,75kW |
| 10ª | 61m   | 18m   | 87,5% | 113,75kW |
| 9ª  | 65,5m | 22,5m | 85%   | 110,5kW  |
| 8ª  | 70m   | 27m   | 85%   | 110,5kW  |
| 7ª  | 74,5m | 31,5m | 85%   | 110,5kW  |
| 6ª  | 79m   | 36m   | 82,5% | 107,25kW |
| 5ª  | 83,5m | 40,5m | 82,5% | 107,25kW |
| 4ª  | 88m   | 45m   | 82,5% | 107,25kW |
| 3ª  | 92,5m | 49,5m | 82,5% | 107,25kW |

Figura E.1 – Tabelas dos rendimentos e capacidades de refrigeração das unidades condensadoras por VRF, selecionadas para o Projeto Proposto, conforme comprimento de linha equivalente e desnível entre as unidades condensadoras e evaporadoras.