

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

EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO  
EM UM PRÉDIO RESIDENCIAL

por

Jorge Cláiton de Souza Grass

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, 21 Junho de 2013



SISTEMAS DE AR CONDICIONADO EM UM PRÉDIO RESIDENCIAL

por

Jorge Cláiton de Souza Grass

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<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de transportes**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Dr. Bardo Erast Josef Bodmann

Porto Alegre, 21 de junho de 2013.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais Luis Antonio Grass e Gládis de Souza Grass por ter tornado possível a conclusão desta etapa, ter acreditado sempre no meu potencial e incentivado meus objetivos.

Agradeço a todos os amigos que conhecem minha trajetória de vida e sempre me auxiliaram para facilitar meus objetivos acadêmicos.

Ao orientador, Prof. Dr. Paulo Otto Beyer pelo tempo disponibilizado para a realização deste trabalho e pelo conhecimento transmitido ao longo deste período.

Grass, J. **Sistemas de Ar Condicionado em um Prédio Residencial**. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo comparar o consumo de energia utilizando recursos de simulação computacional para dois sistemas de ar condicionado em um prédio proposto em competição ASHRAE. Para a modelagem da edificação foi utilizado o *software* Google SketchUp e para a simulação termo energética dos sistemas *Split* (dividido) e VRF (*Variable Refrigerant Flow*) será utilizado o *software* EnergyPlus, identificando qual dos sistemas é mais eficiente energeticamente, levando-se em consideração o período de um ano climático para sistemas dimensionados com base em dias de projeto da cidade de Porto Alegre. Para tanto foi necessário realizar a seleção e dimensionamento dos equipamentos de ar condicionado de acordo com os catálogos dos fabricantes. Através das análises concluiu-se que o sistema de ar condicionado do tipo VRF foi o que apresentou o menor consumo de energia elétrica. Comparativamente com o sistema de ar condicionado *Split*, o VRF tem um consumo 25,6 % menor, porém não satisfatório quanto ao retorno do investimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** EnergyPlus, Eficiência Energética, VRF, *Split*.

Grass, J. **Efficiency of Air Conditioning Systems in a Residential Building**. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## **ABSTRACT**

The present work has as objective comparing the energy consumption using computational simulation resources for two air conditioning systems in a building which was proposed in an ASHRAE competition. The modeling of the building was done using Google SketchUp software and for the thermo-energetical simulation of the Split and VRF (Variable Refrigerant Flow) EnergyPlus will be used, identifying which system is more energetically efficient, considering one climate year for the designed systems, based on project days in the city of Porto Alegre. To this end, it was necessary to perform the selection and dimensioning of the air conditioning equipment in accordance with the manufacturers catalogue. Through the analysis it is concluded that the VRF air conditioning system is the one who showed less energy consumption. Comparatively with the Split air conditioning system, VRF has a 25.6% lower consumption, however it is not satisfactory when it comes to investment payback.

**KEYWORDS:** EnergyPlus, Energy Efficiency, VRF, Split.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4 METODOLOGIA	2
5 MODELAGEM	2
5.1 Google Sketchup e OpenStudio	2
5.2 EnergyPlus	2
5.3 Arquivo climático	2
5.4 Dias de projeto	3
5.5 Variáveis de entrada	3
5.6 Equações de balanço de energia	3
5.6.1 Balanço de energia na face externa da zona	4
5.6.2 Balanço de energia na face interna da zona	4
5.6.3 Balanço de energia nas janelas	5
5.7 Variáveis de saída	5
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
6.1 Sistema de ar condicionado Split	5
6.2 Sistema de ar condicionado VRF	5
7 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	6
7.1 Edificação	6
7.2 Cargas térmicas internas	7
7.2.1 Equipamentos elétricos	7
7.2.2 Pessoas	7
7.2.3 Iluminação	7
7.3 Infiltração	7
7.4 Cronograma de ocupação	7
8 RESULTADOS	8
8.1 Consumo elétrico do sistema Split	8
8.2 Consumo elétrico do sistema VRF	10
8.3 Comparação entre os sistemas Split e VRF	12
9 Retorno do investimento	13
10. CONCLUSÕES	14

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
Apêndice A	16
Apêndice B	17
Apêndice C	18
Apêndice D	19

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos energéticos no mundo é motivo de muitas pesquisas, principalmente devido à cada vez mais escassa fonte destes para a manutenção do modelo atual de utilização. A partir deste cenário, tornou-se necessário o esforço em pesquisas nas mais diversas áreas do conhecimento para o desenvolvimento de alternativas e soluções para os problemas gerados pela sua crescente escassez.

O crescimento econômico de um país depende de um sistema energético que suporte sua capacidade produtiva e também permita que a mesma se desenvolva e faça uso de mais energia. A utilização adequada destes recursos é requisito básico para desenvolver a economia e a sociedade.

No que tange ao emprego de sistemas de ar condicionado, os engenheiros têm empreendido esforços para o desenvolvimento de aparelhos mais eficientes e ecologicamente corretos. Hoje seu emprego é fundamental para o melhor rendimento de quem executa atividades administrativas, ou seja, o conforto gerado pelo sistema proporciona condições para uma maior capacidade produtiva. Em contrapartida, o consumo de energia elétrica é mais elevado, motivando as empresas a estudarem o emprego de sistemas mais eficientes e adequados a sua necessidade.

No uso residencial os sistemas de ar condicionado com elevada eficiência energética vêm ganhando crescente espaço, não apenas por seguirem o conceito de sustentabilidade, mas também por apresentarem redução de custos com energia. A aplicação deste tipo de conceito representa um atrativo econômico para quem utiliza sistemas de ar condicionado e por este motivo há crescentes estudos do seu comportamento em edificações.

Há a necessidade de um estudo preliminar da edificação, sua configuração física, custo do investimento e demanda de energia. A partir desta análise podem ser empregados programas de simulação energética em edificações para a seleção do aparelho de ar condicionado mais adequado.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a simulação com dois tipos de sistemas de ar condicionado e com os dados obtidos escolher o que apresentar menor consumo energético para a aplicação em um edifício residencial proposto pela Competição ASHRAE (2013), sendo o prédio inserido na região bioclimática de Porto Alegre. Após a seleção do sistema o objetivo é a análise de retorno do investimento com o sistema mais eficiente.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram consultadas fontes bibliográficas relacionadas com o tema em estudo e que tiveram a aplicação de simulações termo-energéticas em edificações utilizando o *software* EnergyPlus com diferentes tipos de sistemas de ar condicionado, buscando identificar o que apresenta o menor consumo energético.

Utilizou-se as conclusões destas fontes de forma comparativa aos resultados obtidos neste trabalho, principalmente quanto ao retorno de investimento e eficiência.

Carotenuto, 2009, estudou o desempenho energético de um prédio de elevada inércia térmica e localizado na região bioclimática de Porto Alegre. Carotenuto aplicou na edificação o sistema VRF, no qual foram utilizados os dados fornecidos pelo fabricante como coeficiente de performance (COP), vazão de ar, potência dos ventiladores e potência de refrigeração. Os principais consumidores de energia em ordem decrescente foram os equipamentos, iluminação interna e ar condicionado.

Souza, 2009, utilizando o *software* EnergyPlus, analisou o comportamento energético do prédio novo da Engenharia Mecânica da Universidade do Rio Grande do Sul utilizando os sistemas de ar condicionado VRF e água gelada. Souza concluiu após o estudo que o sistema VRF demonstrou o melhor desempenho anual comparado ao sistema de água gelada em

virtude de não ter os gastos com bombas e torres de resfriamento. Comparativamente, o sistema VRF chegou a ser 21% mais econômico que o água gelada.

Pozza, 2011, propôs a substituição do sistema de ar condicionado de uma residência do tipo *Split* com ciclo reverso por um sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*), e ao final do estudo chegou a conclusão que o consumo energético do aparelho VRF foi de 32,8% menor.

Lucca, 2012, realizou a comparação energética de dois sistemas de ar condicionado, VRF e água gelada, para um prédio fictício localizado na região bioclimática de Porto Alegre. Neste trabalho fora levado em consideração o dimensionamento das bombas do sistema de água gelada. Como resultado comparativo, Lucca obteve para o sistema VRF um consumo 33% menor.

#### 4. METODOLOGIA

Foi utilizado como recurso computacional o *software* EnergyPlus, 2013 (*software* computacional de simulações termo-energéticas em edificações). Os sistemas utilizados serão o tipo *Split* (dividido) e VRF (fluxo de refrigerante variável). Através do resultado obtido nas simulações será feita a seleção do sistema mais eficiente energeticamente a ser aplicado na edificação. Além disso realizou-se a análise de retorno do investimento com a seleção do sistema de ar condicionado.

#### 5. MODELAGEM

O trabalho tem início com a modelagem do prédio proposto utilizando-se o *software* Google Sketchup (2013) versão 8.0 em complemento com o *plug-in* OpenStudio (2013) versão 1.0.10, posteriormente foi utilizada a ferramenta computacional EnergyPlus versão 8 para a simulação termo-energética da edificação.

##### 5.1 GOOGLE SKETCHUP E OPENSTUDIO

Google SketchUp versão 8.0 é uma ferramenta para modelagem tridimensional criada pela At Last Software e adquirida pela Google que permite a criação e edição prática de edificações. Atualmente o programa é fornecido gratuitamente na sua versão mais simples.

*Plug-in* OpenStudio versão 1.0.10 é um *software* que permite a utilização das ferramentas padrão de desenho do Google Sketchup para criar e editar zonas EnergyPlus, permitindo que o usuário altere dados de entrada deste *software*. O programa foi desenvolvido pela National Renewable Energy Laboratory e tem sua distribuição gratuita na página do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

##### 5.2 ENERGYPLUS

*Software* de simulação que permite a avaliação termo-energética de uma edificação dimensionando sua carga térmica e consumo de energia elétrica mensal e anual. Através das análises dos resultados obtidos em simulações pode-se avaliar a influência dos seus elementos construtivos, equipamentos internos, sombreamento e com estas informações propor melhorias para alterar as propriedades de transferência de calor, além de permitir a simulação dos mais diversos sistemas de ar condicionado e a escolha do mais adequado. O programa foi desenvolvido pela National Renewable Energy Laboratory em linguagem Fortran 90 e realiza a simulação buscando manter o *setpoint* de controle térmico através dos cálculos de carga térmica para refrigeração e aquecimento.

### 5.3 ARQUIVO CLIMÁTICO

Para a simulação no *software* EnergyPlus é necessário inserir dados sobre as características climáticas da localidade em análise que incluem pressão, temperatura, umidade, velocidade do ar, radiação solar, direção do vento, etc. Cabe salientar ainda que estas medições são normalmente obtidas e efetuadas em aeroportos, calculados através de análises estatísticas geradas a partir de uma compilação de 12 anos ou mais, gerando os arquivos climáticos do tipo TRY (*Test Reference Year*) e TMY (*Test Meteorological Year*). No TRY escolhe-se o ano mais representativo entre os medidos e no TMY são escolhidos os meses mais representativos. Neste trabalho será utilizado o tipo de arquivo climático TMY. A edificação simulada está localizada na região bioenergética de Porto Alegre e o seu arquivo climático foi obtido na página eletrônica do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE, 2013).

### 5.4 DIAS DE PROJETO

Para determinar a potência de refrigeração e aquecimento do sistema de ar condicionado, ou seja, o seu dimensionamento, será utilizado para a simulação os dias de projeto estatísticos estabelecidos pela ASHRAE, 2009. No resfriamento a temperatura externa do arquivo climático será maior que a temperatura externa considerada no cálculo em no máximo 0,4% das horas do ano, ou seja, o ar condicionado pode neste período não atender completamente ao que foi dimensionado (temperatura de 25°C para este trabalho) e para o aquecimento maior em no máximo 99,6% das horas do ano, ou seja, o ar condicionado poderá não atender ao que foi dimensionado (temperatura de 22°C para este trabalho). Isto resulta em uma ocorrência cumulativa anual de 0,4% para verão e 99,6 para inverno. Os dias de projeto seguem no apêndice D.

### 5.5 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Os dados de entrada são fundamentais para que o *software* de simulação EnergyPlus forneça solução o mais próximo de uma condição real. Este processo de alimentação de dados se dá com o modelamento do prédio no Google Sketchup em conjunto com o *Plug-in* Open Studio. O passo seguinte é estabelecer as características de transferência de calor de todas as superfícies presentes na edificação, bem como espessura, densidade, condutividade térmica, refletividade, tonalidade de cores. Posteriormente se declara a ocupação de pessoas, número de equipamentos e sua potência, infiltrações, potência dos sistemas de ar condicionado, iluminação e período de utilização dos equipamentos.

Outro ponto importante no presente trabalho é aproximar o máximo possível o modelo de uma situação real utilizando sistemas de ar condicionado existentes no mercado usando o seu coeficiente de performance [COP], que é o efeito útil pela energia gasta, para selecionar o sistema.

As simulações dos sistemas de ar condicionado é realizada no modo de auto dimensionamento (autosize), a partir dos dados gerados é possível dimensionar as máquinas através de catálogos dos fabricantes.

Para o sistema de ar condicionado Split em refrigeração foi selecionado COP 3,03 e em aquecimento COP 3,40 [Carrier, 2013]; para o sistema VRF em refrigeração foi selecionado COP 3,93 e em aquecimento COP 4,40 [Toshiba, 2013]; O conforto térmico dos ambientes a serem condicionados pelos dois sistemas é garantido através do controle do *set point* definido como 25°C para verão (refrigeração) e 22°C para inverno (aquecimento).

## 5.6 EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA

O EnergyPlus utiliza como base de cálculo para a resolução do balanço de energia da zona térmica a equação [EnergyPlus Engineering Reference, 2011]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{Ncl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nz} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (1)$$

onde  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a taxa de energia acumulada na zona térmica,  $\sum_{i=1}^{Ncl} \dot{Q}_i$  é a soma das cargas internas convectivas,  $\sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a taxa de calor devido a convecção nas superfícies,  $\sum_{i=1}^{Nz} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  é o somatório das misturas de fluxo de ar entre zonas,  $\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$  é a transferência de calor por infiltração de ar exterior e  $\dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z)$  é o fluxo de calor gerado pelo sistema de ar condicionado. O coeficiente  $C_z$  pode ser expresso por  $C_z = \rho_{air} C_p C_T$ , onde  $\rho_{air}$  é a massa específica,  $C_p$  é o calor específico do ar e  $C_T$  é um multiplicador de  $C_p$  que tem a função de estabilizar a simulação tendo valor inicial assumido igual a 1. A equação 1 deverá apresentar balanço de energia nulo quando o ambiente estiver condicionado, pois o termo referente a taxa de calor do ar condicionado deverá anular o somatório dos outros termos.

A transmissão de calor através das superfícies é calculada por função de transferência (CTF – *Conduction Transfer Function*), a qual relaciona o fluxo de calor de um elemento da superfície com uma série infinita de resultados de ambos os lados, como podem ser vistas nas equações (2) e (3), para fluxo interno e externo respectivamente.

$$q_{ki}''(t) = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ki,t-j\delta}'' \quad (2)$$

$$q_{ko}''(t) = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ko,t-j\delta}'' \quad (3)$$

onde,  $X_j$  é o coeficiente CTF externo,  $j=0,1,\dots,nz$ ;  $Y_j$  é o coeficiente CTF de condução na superfície,  $j=0,1,\dots,nz$ ;  $Z_j$  é o coeficiente externo da CFT,  $j=0,1,\dots,nz$ ;  $\Phi_j$  é o coeficiente de fluxo de calor da CTF,  $j=0,1,\dots,nq$ ;  $T_i$  é a temperatura da face interior da superfície (K);  $T_o$  é a temperatura da face exterior da superfície (K);  $q_{ki}''$  é o fluxo de calor por condução na face interna da superfície e  $q_{ko}''$  é o fluxo de calor por condução na face externa da superfície.

### 5.6.1 BALANÇO DE ENERGIA NA FACE EXTERNA DA ZONA

A parede externa de uma zona tem o seu balanço de energia expresso pela equação (4) [EnergyPlus 2011]:

$$q_{\alpha sol}'' + q_{LWR}'' + q_{conv}'' - q_{ko}'' = 0 \quad (4)$$

onde  $q_{\alpha sol}''$  é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida;  $q_{LWR}''$  é o fluxo de radiação de comprimento de onda longo trocado com o meio (que é a absorção e emitância de fontes de baixa temperatura, como por exemplo equipamentos, pessoas e outras superfícies);  $q_{conv}''$  é o fluxo de calor trocado por convecção entre a superfície e o ar exterior e  $q_{ko}''$  é o fluxo de calor trocado com a face externa da parede, todos os termos expressos em  $W/m^2$ .

### 5.6.2 BALANÇO DE ENERGIA NA FACE INTERNA DA ZONA

A parede interna de uma zona térmica tem o seu balanço de energia expresso pela equação (5) [EnergyPlus 2011]:

$$q_{lwx}'' + q_{sw}'' + q_{lws}'' + q_{ki}'' + q_{sol}'' + q_{conv}'' = 0 \quad (5)$$

onde  $q''_{lwx}$  é o fluxo de radiação de comprimento de onda longa trocado entre as superfícies;  $q''_{sw}$  é o fluxo de radiação de comprimento de onda curto emitido por lâmpadas e a radiação solar que incide através das janelas no interior da zona;  $q''_{lws}$  é o fluxo de calor de ondas longas emitido por equipamentos;  $q''_{ki}$  é o fluxo de condução de calor conduzido na face interna da parede;  $q''_{sol}$  é o fluxo de radiação solar absorvida e transmitida pela superfície;  $q''_{conv}$  é o fluxo de calor por condução com o ar na zona, todos os termos expressos em  $W/m^2$ .

### 5.6.3 BALANÇO DE ENERGIA NAS JANELAS

As superfícies translúcidas tem seu balanço de energia expresso pela equação (6):

$$Q = U \times apf(T_{out} - T_{in}) + (SHGC) \times apf \times Et \quad (6)$$

onde Q é o fluxo de energia em (W); U é o coeficiente de transferência de calor em ( $W/m^2K$ ); apf é a área da superfície translúcida em ( $m^2$ );  $T_{out}$  é a temperatura externa do ar em ( $^{\circ}C$ );  $T_{in}$  é a temperatura interna do ar no ambiente em ( $^{\circ}C$ ); SHGC é o coeficiente de ganho de calor solar (adimensional), Et é a radiação total incidente em  $W/m^2$ .

### 5.7 VARIÁVEIS DE SAÍDA

O *software* de simulação EnergyPlus permite a escolha de diversos dados de saída, o que permite ao usuário uma variedade de informações conforme seu direcionamento de estudo.

Neste trabalho há dois sistemas em estudo que são o *Split* e o VRF, sendo analisados os dados de potência de refrigeração, potência de aquecimento, temperatura, calor sensível e horário de pico de demanda de energia. Os parâmetros de saída selecionados são apresentados em forma de planilhas, o que permite a geração de gráficos, facilitando a compreensão do comportamento da edificação. Como será realizada a comparação entre os dois sistemas citados acima, há a necessidade de gerar dados através de relatórios de consumo elétrico do ar condicionado, equipamentos elétricos, iluminação e potência dos ventiladores, os quais terão seus consumos de energia apresentados em forma mensal e anual.

## 6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os sistemas de ar condicionado são aparelhos que tem a função de proporcionar conforto térmico, mas como esta sensação é subjetiva devido às grandes variações individuais se torna difícil determinar condições que possam proporcionar conforto para 100% das pessoas. Com isto os parâmetros que definem se o ambiente é considerado termicamente confortável devem atender a uma percentagem de 80% ou mais das pessoas, de um grupo homogêneo em termos de atividade física e tipo de roupa usada de forma a expressar satisfação em relação ao conforto térmico (ABNT, 2008). Associados ao conforto térmico salienta-se que o sistema de ar condicionado deve controlar outros parâmetros simultaneamente, tais como umidade, renovação de ar, movimentação e qualidade do ar em um ambiente.

### 6.1 SISTEMA DE AR CONDICIONADO SPLIT

O sistema de ar condicionado *Split* é composto por duas unidades, uma externa e uma interna, sendo ambas as unidades unidas por tubulação de cobre por onde ocorre a passagem do fluido refrigerante. O sistema empregado tem ciclo reverso, ou seja, trabalha de forma a poder refrigerar ou aquecer o ambiente que se quer climatizar. Portanto, se a condição de utilização do ar condicionado for de refrigerar o ambiente, a unidade interna será a

evaporadora e a externa a condensadora. Caso a condição de utilização for de aquecimento a unidade interna será a condensadora e a externa a evaporadora.

## 6.2 SISTEMA DE AR CONDICIONADO VRF

O sistema de ar condicionado VRF assemelha-se ao sistema *Split*, contudo sua particularidade se dá pela possibilidade de utilização de mais unidades internas. Somado a isto a unidade externa possui componentes de controle eletrônicos que permitem variar a vazão de refrigerante pela rotação do compressor, conforme a demanda de potência ou carga térmica em uma zona, reduzindo o consumo de energia elétrica.

Os dois sistemas, *Split* e VRF, fazem a evaporação do fluido refrigerante em uma serpentina através da troca de calor com o ar, sistema conhecido como expansão direta.

## 7. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O prédio Dallas Power & Light foi proposto em competição (ASHRAE, 2013) para diversas categorias e o presente trabalho está inserido no *HVAC System Selection*, que corresponde à seleção de sistemas de ar condicionado, buscando-se estimular a preocupação com sustentabilidade e eficiência energética. Por se tratar de um prédio com perfil de utilização residencial, optou-se por avaliar a seleção dos sistemas de ar condicionado conforme os tipos utilizados no Brasil, que neste caso são os modelos Split com ciclo reverso e o VRF.

A partir deste desafio modelou-se a edificação, aplicando-se os sistemas de ar condicionado para analisar seu comportamento termo-energético e por fim selecionou-se o sistema mais eficiente para apartamentos residenciais.

Segue figura 5.1 com uma foto do prédio e o modelo no GoogleSketchup.

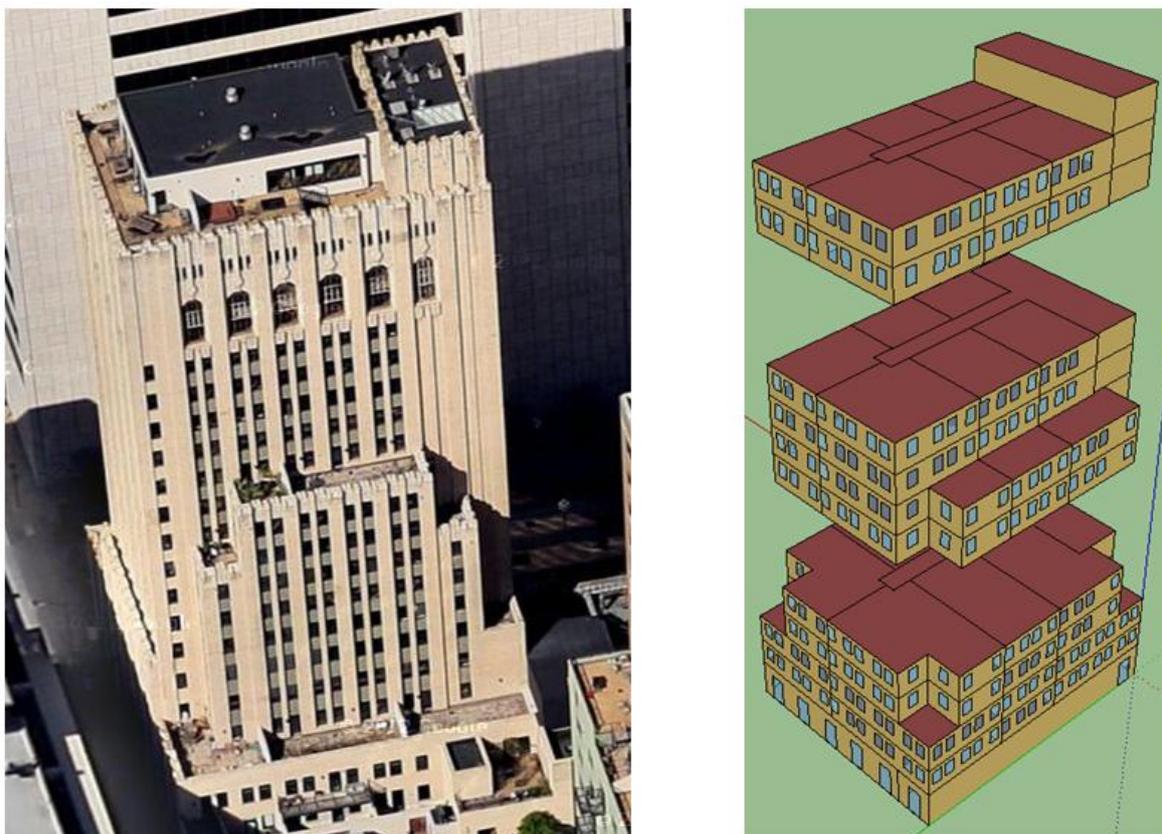


Figura 5.1 – Foto do prédio e modelo feito no GoogleSketchup.

## 7.1 EDIFICAÇÃO

O prédio foi analisado na região bioclimática de Porto Alegre. O prédio apresenta azimute igual à zero, sendo a face voltada para a direção norte a de entrada na edificação. A planta baixa do prédio segue no apêndice B e os materiais utilizados na edificação e suas propriedades térmicas seguem no apêndice C.

O prédio é composto por 20 pavimentos sendo que no térreo há uma livraria e *hall*-elevador, nos demais andares há apartamentos residenciais e corredores, havendo no último andar apenas a sala de máquinas. No térreo a livraria e o *hall*-elevador são climatizados e constituem duas zonas, nos andares seguintes há 6 zonas por andar que correspondem aos 6 apartamentos.

Como a edificação possui andares com características construtivas iguais, os pavimentos 5,10,13 e 18 são multiplicados por três através da ferramenta de multiplicação de dados de entrada (*multiplier*), totalizando 62 zonas. O prédio tem área total de 10143 m<sup>2</sup>, sendo 8141 m<sup>2</sup> de área condicionada e 2002 m<sup>2</sup> de área não condicionada. Cabe salientar que os corredores presentes por andar não serão climatizados e não será considerado sombreamento em nenhuma das orientações do prédio.

## 7.2 CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

As fontes geradoras de calor e umidade em um ambiente, as quais produzem carga térmica, são chamadas de cargas térmicas internas e correspondem ao calor liberado pelos equipamentos elétricos, pessoas e sistema de iluminação.

### 7.2.1 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Como a edificação em estudo é do tipo residencial, atribuiu-se equipamentos relacionados com esta característica, tais como: televisão, computador, refrigerador, cafeteiras, etc. Os equipamentos elétricos têm grande contribuição para a carga térmica no ambiente e seu consumo médio em kW.h está baseado em seu hábito real de uso, conforme Eletrobrás, 2013. A fração radiante de 0,3 foi adotada para os equipamentos elétricos, conforme ASHRAE, 2009.

### 7.2.2 PESSOAS

Por se tratar de um prédio residencial, aplicou-se para os apartamentos uma média de três pessoas por apartamento (36 m<sup>2</sup>/pessoa) e no *hall*-elevador e biblioteca uma média de vinte e três pessoas (15 m<sup>2</sup>/pessoa). No momento do cálculo da carga térmica há 285 pessoas no prédio e atribuiu-se a eles uma fração radiante de 0,5 sobre o calor sensível (ASHRAE, 2009).

### 7.2.3 ILUMINAÇÃO

A taxa de iluminação correspondente ao tipo de ambiente gera diferentes dissipações térmicas, conseqüentemente diferentes consumos e influência relevante para a análise energética da edificação. Para os apartamentos foi utilizada taxa de iluminação de 9 W/m<sup>2</sup> e para o lobby-elevador e biblioteca 16 W/m<sup>2</sup>, conforme ABNT, 2008. A fração radiante utilizada para a iluminação foi de 0,42 e a fração visível de 0,18 (ASHRAE, 2009).

## 7.3 INFILTRAÇÕES

Os ambientes condicionados tiveram infiltrações estabelecidas em 0,75 troca por hora nos apartamentos e de 1 troca por hora no *hall*-elevador e biblioteca (ASHRAE, 2009).

## 7.4 CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO

Para o cálculo da carga térmica é necessário inserir os parâmetros de ocupação no prédio, os quais correspondem aos dias e horários de ocupação, além do período em que o sistema de iluminação está ligado, pessoas estão ou não presentes, equipamentos e período de funcionamento do sistema de ar condicionado. Para isso os cronogramas de ocupação são preenchidos de maneira percentual, onde um representa o valor de máxima utilização e zero para nenhuma utilização. Cabe salientar ainda que se consideram na análise os dias da semana, finais de semana e feriados correspondentes ao período de 2013.

## 8 RESULTADOS

Neste capítulo se apresentam os resultados obtidos através da simulação com o *software* EnergyPlus para os dois sistemas simulados na edificação, *Split* e VRF. Inicialmente serão apresentados os resultados para o sistema *Split* constando o consumo elétrico anual e mensal, posteriormente os mesmos resultados serão apresentados para o sistema VRF e por fim um comparativo do consumo de ambos os sistemas. O período de análise para os dois tipos de ar condicionado foi de 365 dias e o ano 2013.

### 8.1 CONSUMO ELÉTRICO DO SISTEMA SPLIT

O comportamento energético da edificação, ou seja, o consumo de energia anual em kW.h para os equipamentos internos assumidos, iluminação interna e o sistema de ar condicionado *Split* em análise são apresentados na Figura 8.1 abaixo.

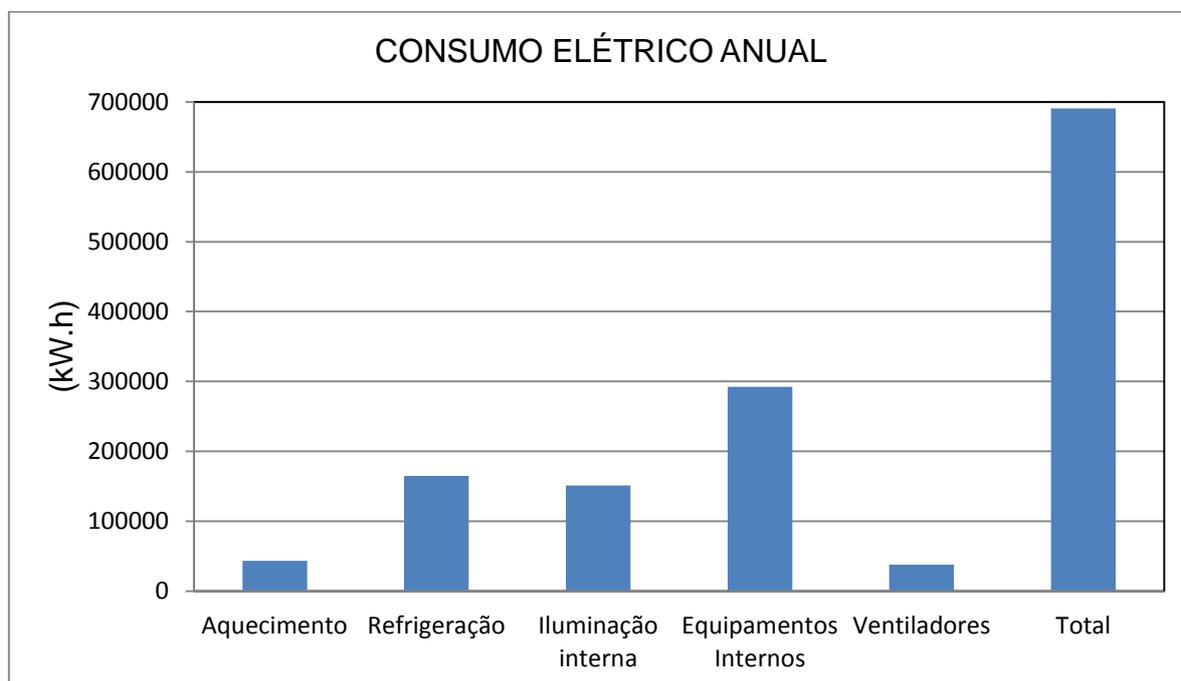


Figura 8.1 – Consumo elétrico anual da edificação com o sistema *Split*

A Figura 8.1 apresenta o consumo elétrico anual dos ventiladores, equipamentos internos, iluminação, ar condicionado *Split* em refrigeração e aquecimento. O consumo total presente na edificação é de 690674 kW.h e a maior participação no consumo de energia se dá pelos equipamentos internos 292584 kW.h, seguido do sistema de ar condicionado em refrigeração 164996 kW.h, iluminação interna 151511 kW.h, sistema de ar condicionado em aquecimento 43437 kW.h e ventiladores 38147 kW.h.

A Figura 8.2 traz a contribuição de cada componente no consumo elétrico anual.

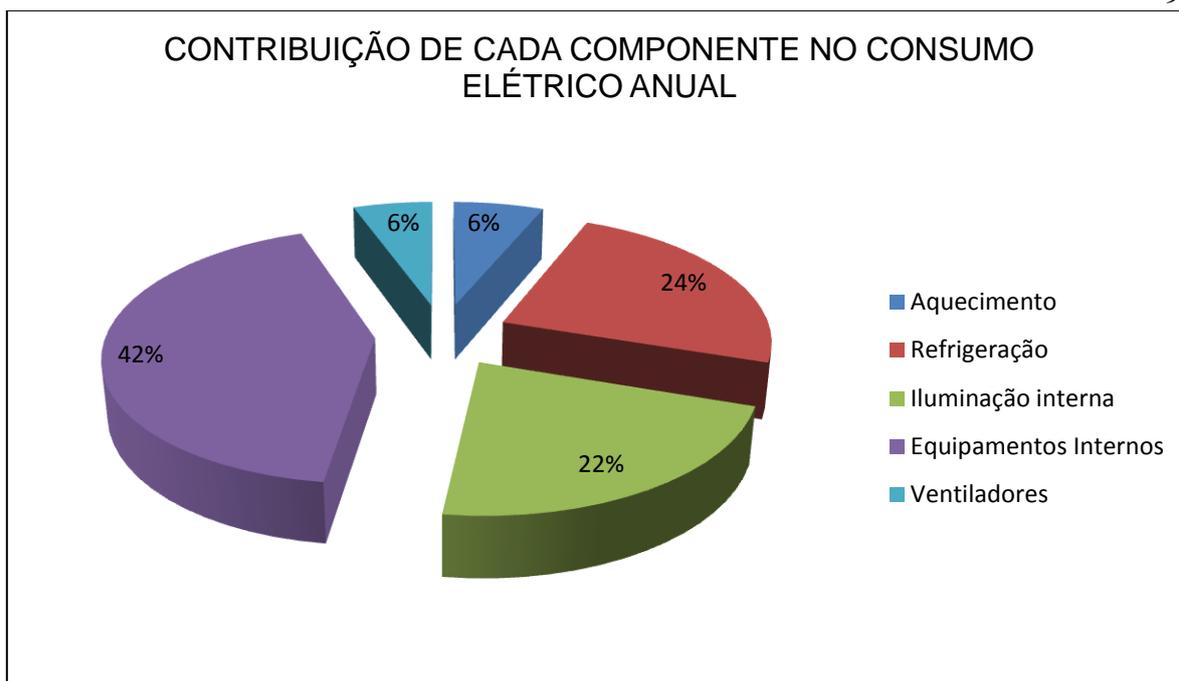


Figura 8.2 – Consumo percentual anual do sistema *Split*.

Conforme a Figura 8.2, percentualmente a sequência de demanda energética fica para equipamentos internos 42%, sistema de ar condicionado em refrigeração 24%, iluminação interna 22%, sistema de ar condicionado em aquecimento 6% e ventiladores 6%.

É interessante estender a análise para o período mensal de forma a visualizar o consumo do sistema de ar condicionado em análise mês a mês.

É apresentado na Figura 8.3 o consumo elétrico mensal de todos os componentes em estudo.

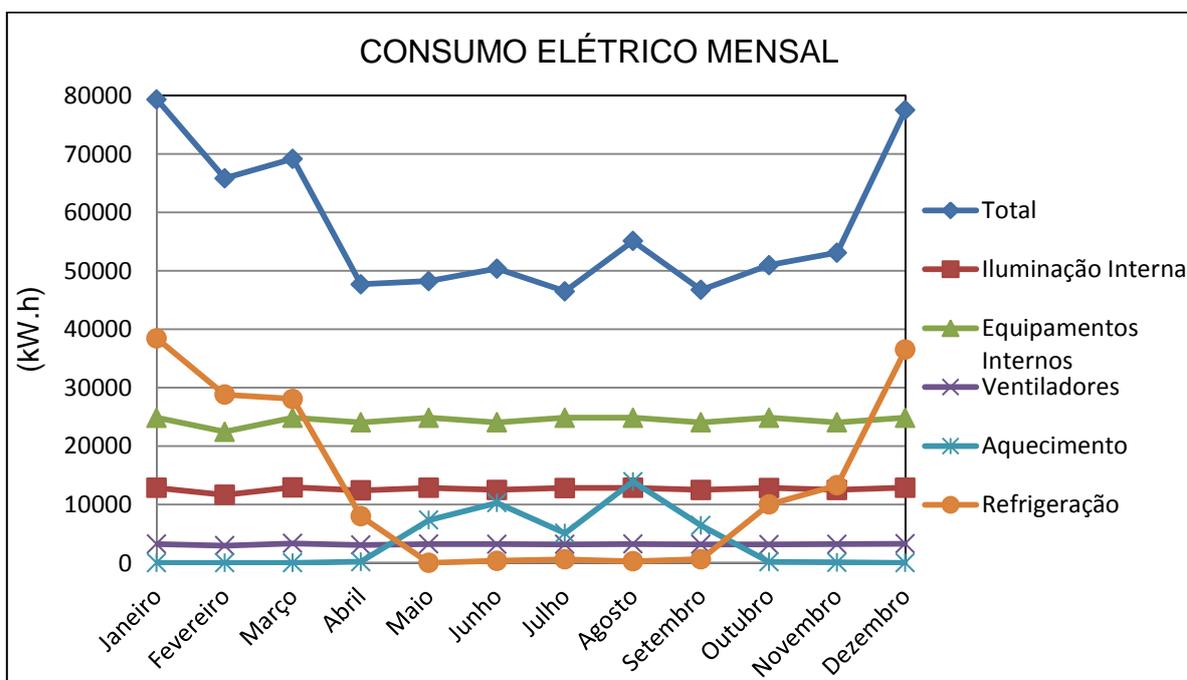


Figura 8.3 – Consumo de energia elétrica mensal da edificação com o sistema *Split*.

Através do apresentado na Figura 8.3 é possível identificar que durante o ano em análise o consumo do sistema de iluminação interna, equipamentos internos e ventiladores se mantêm praticamente inalterados mês a mês e seus valores médios são 12626 kW.h, 24382 kW.h e 3179 kW.h, respectivamente. Este comportamento se dá pela característica da edificação durante o período e é coerente segundo seu modo de utilização, ou seja, sua ocupação. O modo de utilização são as características de equipamentos utilizados e horários de ocupação, utilização dos sistemas de ar condicionado, iluminação e equipamentos internos. Para o sistema de ar condicionada do tipo *Split* o maior consumo anual se dá durante o mês de Janeiro e corresponde a 38428 kW.h para resfriamento. Percebe-se que durante os meses de Abril a Novembro a necessidade de refrigeração se torna muito pequena ou quase inexistente. Para este mesmo sistema em aquecimento percebe-se que sua maior demanda ocorre no mês de Agosto e corresponde a 13905 kW.h e ocorre a sua maior necessidade durante os meses de Maio a Setembro. O consumo total no prédio tem seu valor máximo no mês de Janeiro 79347 kW.h e é fortemente influenciado pela demanda de refrigeração dos ambientes impostas ao sistema de ar condicionado.

## 8.2 CONSUMO ELÉTRICO DO SISTEMA VRF

As análises referentes ao sistema VRF se assemelham ao do sistema *Split*, primeiramente demonstrando o consumo anual do prédio e posteriormente o consumo mensal.

A Figura 8.4 traz o consumo de energia anual para o prédio proposto com o sistema de ar condicionado VRF selecionado.

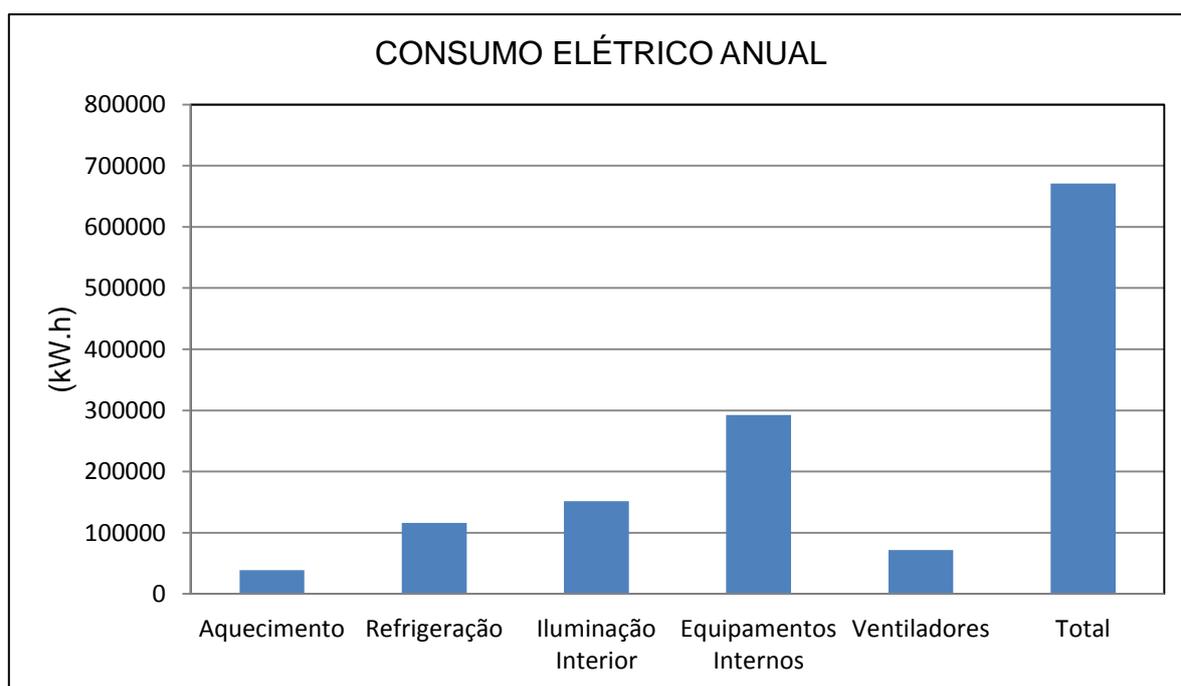


Figura 8.4 – Consumo de energia anual da edificação com o sistema VRF.

A figura 8.4 apresenta o consumo elétrico anual dos ventiladores, equipamentos internos, iluminação e ar condicionado VRF em refrigeração e aquecimento. O consumo total presente na edificação é de 670983 kW.h e a maior participação no consumo de energia se dá pelos equipamentos internos 292584 kW.h, iluminação interna 151511 kW.h, seguido do sistema de ar condicionado em Refrigeração 116263 kW.h, ventiladores 71761 kW.h e sistema de ar condicionado em aquecimento 38864 kW.h.

A figura 8.5 traz a contribuição de cada componente no consumo elétrico anual.

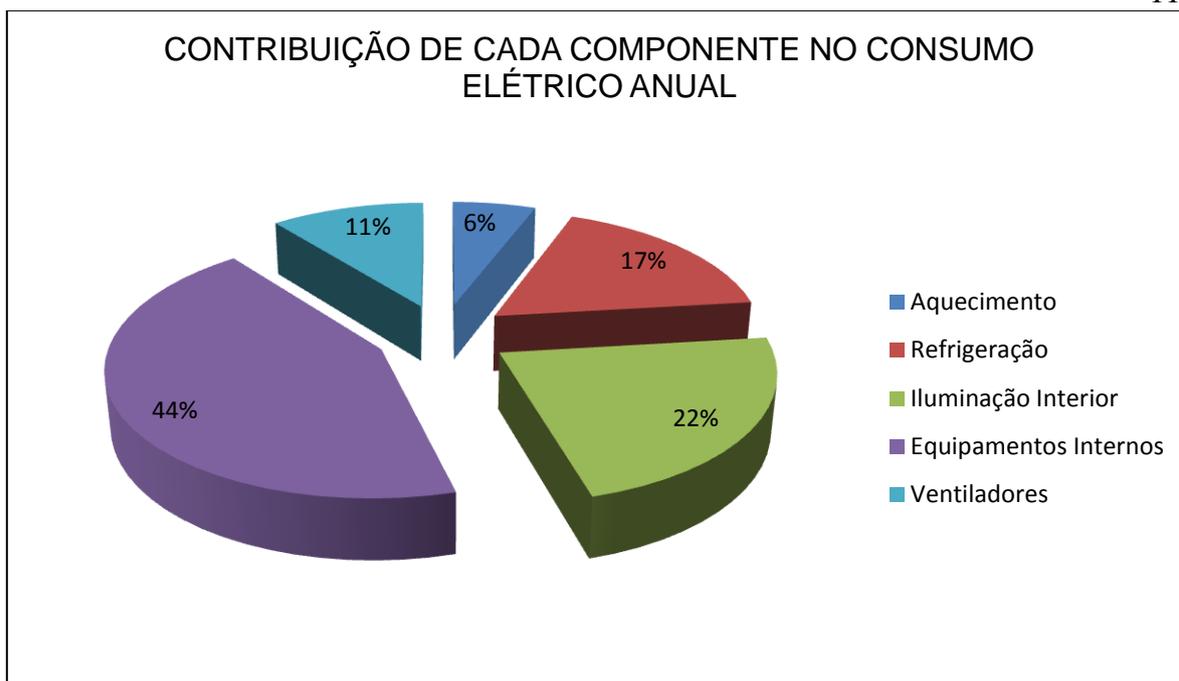


Figura 8.5 – Contribuição de cada componente no consumo total anual do sistema VRF.

Conforme Figura 8.5, em percentagem a sequência de demanda energética fica para equipamentos internos 44%, iluminação interna 22%, sistema de ar condicionado em refrigeração 17%, ventiladores 11% e sistema de ar condicionado em aquecimento 6%. Estenderemos a análise para o período mensal de forma a visualizar o consumo do sistema de ar condicionado em análise.

Apresenta-se a Figura 8.6 com o consumo elétrico mensal de todos os componentes em estudo.

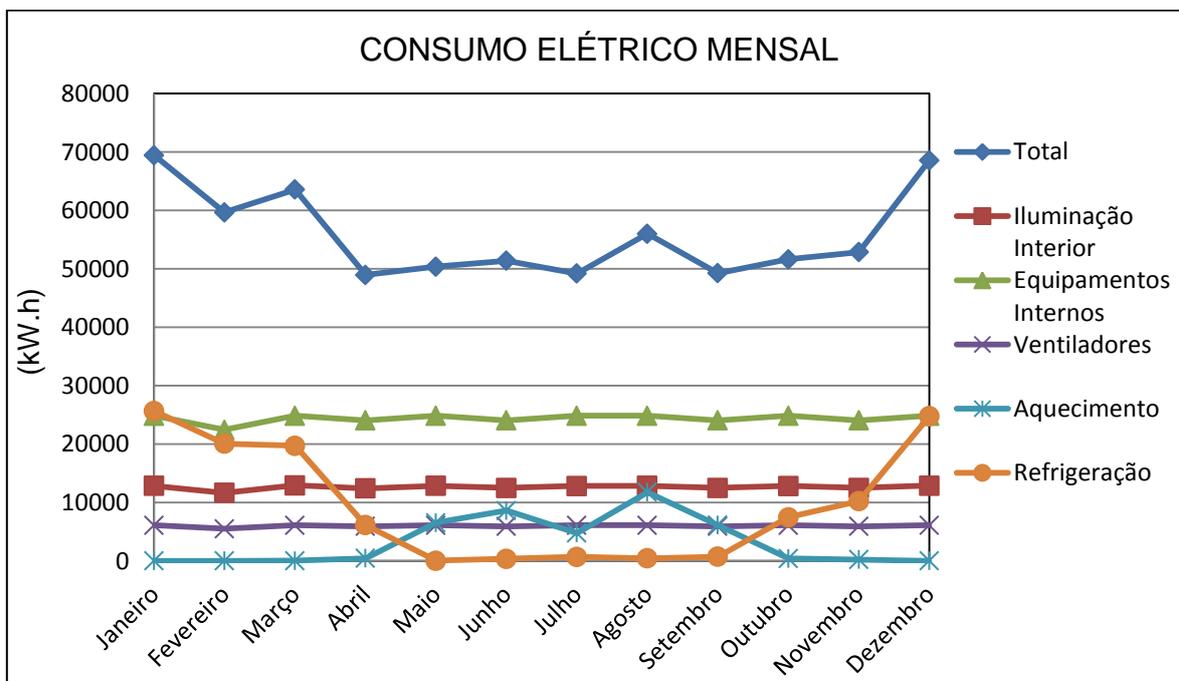


Figura 8.6 - Consumo de energia elétrica mensal da edificação com o sistema VRF.

Através do apresentado na Figura 8.6 é possível identificar que durante o ano em análise o consumo do sistema de iluminação interna, equipamentos internos e ventiladores se mantêm praticamente inalterados mês a mês e seus valores médios são 12626 kW.h, 24382 kW.h e 5980 kW.h, respectivamente. Este comportamento se dá pela característica da edificação durante o período em análise e é coerente segundo seu modo de utilização, ou seja, sua ocupação. Para o sistema de ar condicionado do tipo VRF o maior consumo anual se dá durante o mês de Janeiro e corresponde a 25668 kW.h para resfriamento. Percebe-se que durante os meses de Abril a Novembro a necessidade de refrigeração se torna muito pequena ou quase inexistente. Para este mesmo sistema em aquecimento percebe-se que sua maior demanda ocorre no mês de Agosto e corresponde a 11760 kW.h e ocorre a sua maior necessidade durante os meses de Maio a Setembro. O consumo total no prédio tem seu valor máximo no mês de Janeiro 69466 kW.h e é fortemente influenciado pela demanda de refrigeração dos ambientes impostas ao sistema de ar condicionado.

### 8.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS SPLIT E VRF

A figura 8.7 apresenta o consumo de energia anual para a edificação comparando os dois sistemas.

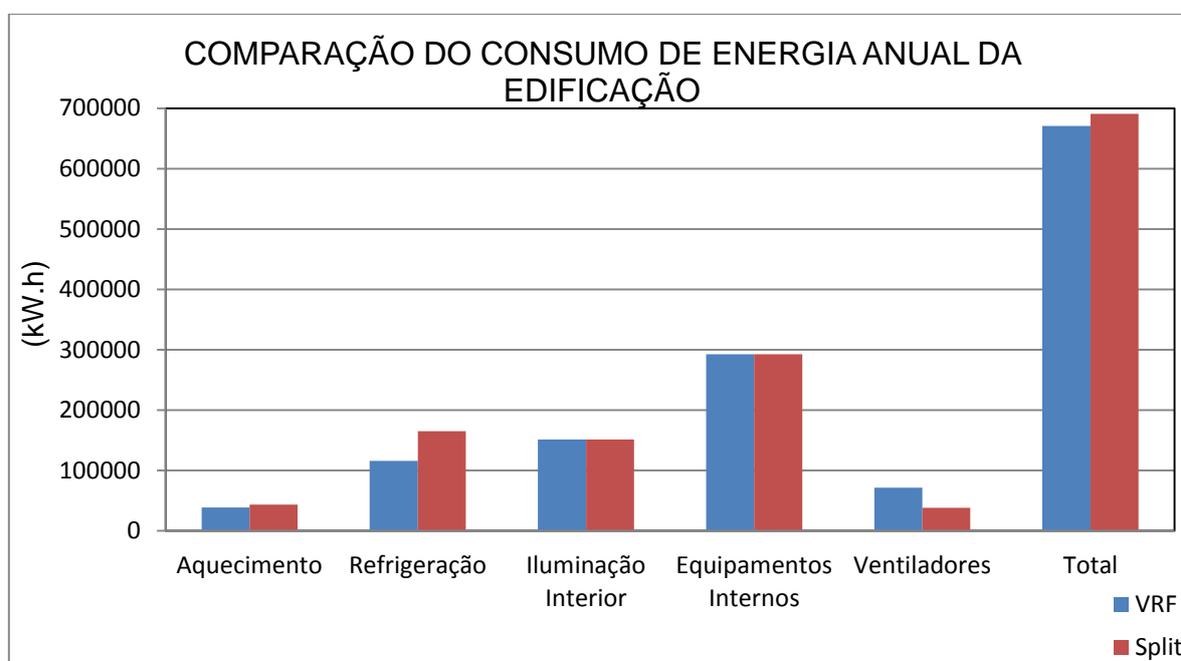


Figura 8.7 – Comparação de consumo anual dos sistemas Split e VRF para a edificação

Como pode ser visto na Figura 8.7, alguns itens analisados mantêm o consumo igualmente como o sistema de iluminação e equipamentos internos. Tal comportamento é justificado pela característica de ocupação do prédio simulado que é a mesma no sistema Split e VRF. Para o sistema de ar condicionado em refrigeração o sistema VRF tem um consumo 29,5% menor em relação ao Split. Em aquecimento o consumo do VRF é 10,5% menor em relação ao Split. No total o sistema VRF tem um consumo 25,6% menor. Tal vantagem se dá devido a característica de funcionamento da máquina VRF externa que em cargas parciais acaba sendo mais eficiente.

Na Figura 8.8 observa-se o consumo mensal comparativo para os dois sistemas empregados na edificação.

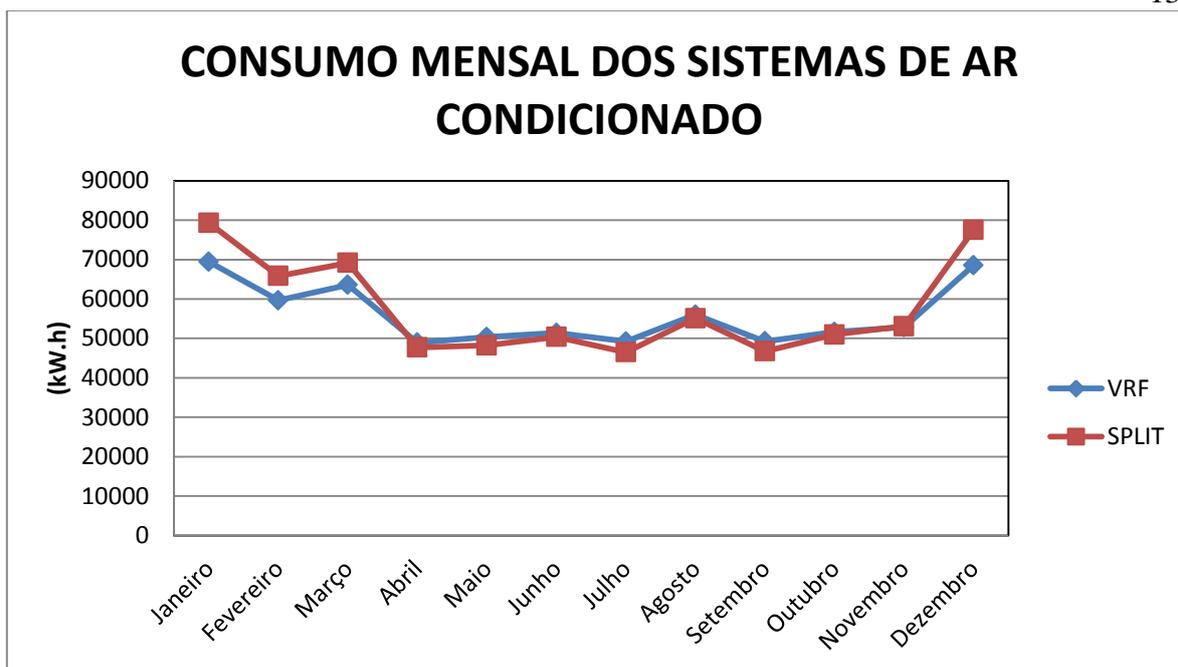


Figura 8.8 – Consumo comparativo mensal dos sistemas Split e VRF

Como pode ser visto na Figura 8.8 o período de maior diferença entre os sistemas se dá entre o mês de Dezembro e Março, onde a demanda por refrigeração é bastante exigida em virtude da estação climática (verão). Percebe-se que o sistema com VRF tem menor demanda neste período, pois tem maior eficiência em cargas parciais, ou seja, onde o sistema não é exigido ao máximo, com isso o controle de frequência do compressor torna o ar condicionado com fluxo de refrigerante variável superior ao *Split*. Nos meses de Maio a Novembro o sistema com *Split* apresentou vantagem em comparação ao sistema VRF, o que pode ser explicado pela limitação encontrada em desligar os ventiladores do sistema com VRF no *software* EnergyPlus. Analisando os resultados pode-se perceber que a demanda máxima do VRF é de 69466 kW.h e do *Split* é de 79347 kW.h, o que equivale a uma redução no pico de consumo relativo ao ar condicionado de 14,2%, além disso verifica-se que a curva do sistema VRF é mais homogênea e com isso há um beneficiamento do sistema de distribuição da rede elétrica.

O consumo com ar condicionado na edificação (Figura 8.7) para o período de um ano com o sistema VRF foi de 155128 kW.h e o consumo total do sistema Split foi de 208433 kW.h, o que significa uma redução no consumo com ar condicionado de 25,6%. Com uma tarifa de 0,3942 R\$/kW.h [CEEE, 2013] a diferença no consumo total do prédio é equivalente a R\$ 21 013,03 de custo a menos com a utilização de um sistema de condicionado do tipo VRF em um período de um ano.

## 9. RETORNO DO INVESTIMENTO

Com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica do investimento buscou-se analisar em quanto tempo seria alcançado o retorno com a aquisição do sistema de ar condicionado do tipo VRF. Para isso buscou-se os valores de mercado para os sistemas selecionados que foram de R\$ 468 000,00 para o *Split* e 761 200,00 para o VRF. A diferença no custo de aquisição dos aparelhos é de R\$ 293 200,00 e a diferença de custo anual com o consumo de energia elétrica no prédio é de R\$ 21 013,00, com estes dados será realizada uma análise de *payback* considerando retorno mensal e índice de inflação IPC (índice de preço ao consumidor) de 7,5% estimado por economistas para o ano de 2013 (G1, 2013). Segue equação 7 para análise de *payback*.

$$VPL(i) = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (7)$$

onde VPL é o valor presente líquido (R\$), FC é o fluxo de caixa (R\$), j é um período genérico para a análise e i é a taxa de juros mensal.

Como resultado do cálculo da equação (7), levando-se em consideração a desvalorização da moeda, mesmo após 30 anos não se chegou a um retorno para o investimento com o sistema VRF.

Portanto a economia gerada ao longo de um período correspondente aos trinta primeiros anos (R\$ 248 172,83), não cobriu o investimento com este sistema que foi de R\$ 293 200,00, com isto conclui-se que para edificações residenciais um sistema de ar condicionado do tipo VRF não é economicamente viável quando comparado ao *Split*.

## 10 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a comparação entre dois sistemas de ar condicionado em uma prédio residencial proposto pela ASHRAE, para isso fez-se a utilização do *software* de simulação termo-energética em edificações EnergyPlus e com este, análise aprofundada da demanda de energia do prédio com os seu equipamentos internos e também o consumo energético dos sistemas de ar condicionado, foco deste trabalho.

O prédio, por ser residencial, tem sua utilização dada em períodos em que a carga térmica na edificação passa a diminuir, ou seja, a ocupação se dá de forma mais intensa ao final do dia, quando as pessoas chegam de suas tarefas diárias.

Após as simulações conclui-se que o sistema de ar condicionado que consome menos energia, ou seja, o que vai demandar menor consumo durante o ano é o VRF. Esta vantagem se dá pelo seu modo de funcionamento em carga parcial, período em que a carga térmica se afasta da nominal, com isso o sistema de ar condicionado consegue atender só os ambientes que necessitam de refrigeração.

Analisou-se o tempo de retorno (*payback*) que o investimento em um sistema mais eficiente, porém de maior custo, teria para esta edificação e não se obteve um tempo de retorno economicamente viável para a aplicação do sistema de ar condicionado do tipo VRF.

Para trabalhos futuros sugere-se a importância em realizar um comparativo entre o mesmo sistema *Split* e um sistema *Split* com tecnologia *inverter*, a fim de aprofundar a análise para edificações de perfil residencial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 16401 “Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários”. Rio de Janeiro, 2008.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. **ASHRAE Handbook Fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASHRAE – American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Student Competition, <https://www.ashrae.org/>, Acessado em 8de Março de 2013.

Companhia Estadual de Energia Elétrica. “**Tarifas para poderes públicos**”. Disponível em: <http://www.ceee.com.br> , Acessado em 8 de Junho de 2013.

Carotenuto, A. R.; “**Análise do desempenho termo-energético 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.

Eletrobras, <http://www.eletrobras.com.br>, Acessado em 7 de Abril de 2013.

**EnergyPlus 8.0** disponível em <http://www.energy.gov> . Acessado em 8 de Março de 2013.

EnergyPlus, 2013. “**EnergyPlus Input Output Reference The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**”, Version 8.0. Ernest Orland Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, USA.

G1 - O portal de notícias da Globo, <http://g1.globo.com/economia/>. Acessado em 11 de junho de 2013.

Google SketchUp, <http://www.sketchup.com/intl/pt-BR/>. Acessado em 8 de Março de 2013.

Labeee, Laboratório de eficiência energética em edificações, “Arquivos climáticos”, <http://www.labeee.ufsc.br/>, Acessado em 7 de Abril de 2013.

Lucca, T.M.; “**Comparação entre sistemas de ar condicionado com fluxo de refrigerante variável e água gelada**”, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

**OpenStudio 1.0.10** disponível em <http://www.energy.gov> . Acessado em 8 de Março de 2013.

Pozza, F., “**Análise térmica e energética de uma edificação residencial climatizada com sistema de fluxo refrigerante variável – VRF**” Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

Souza, W.B., “**Comparação entre dois sistemas de ar condicionado para um prédio histórico**”, Monografia (trabalho de conclusão do curso de engenharia mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Carrier, Especificações e manual do proprietário Hi Wall Carrier, <http://www.springer.com.br/>, consultado em 10 de junho de 2013.

Toshiba, Manual de Projeto SMMSi – A, <http://www.springer.com.br/>. Acessado em 10 de junho de 2013.

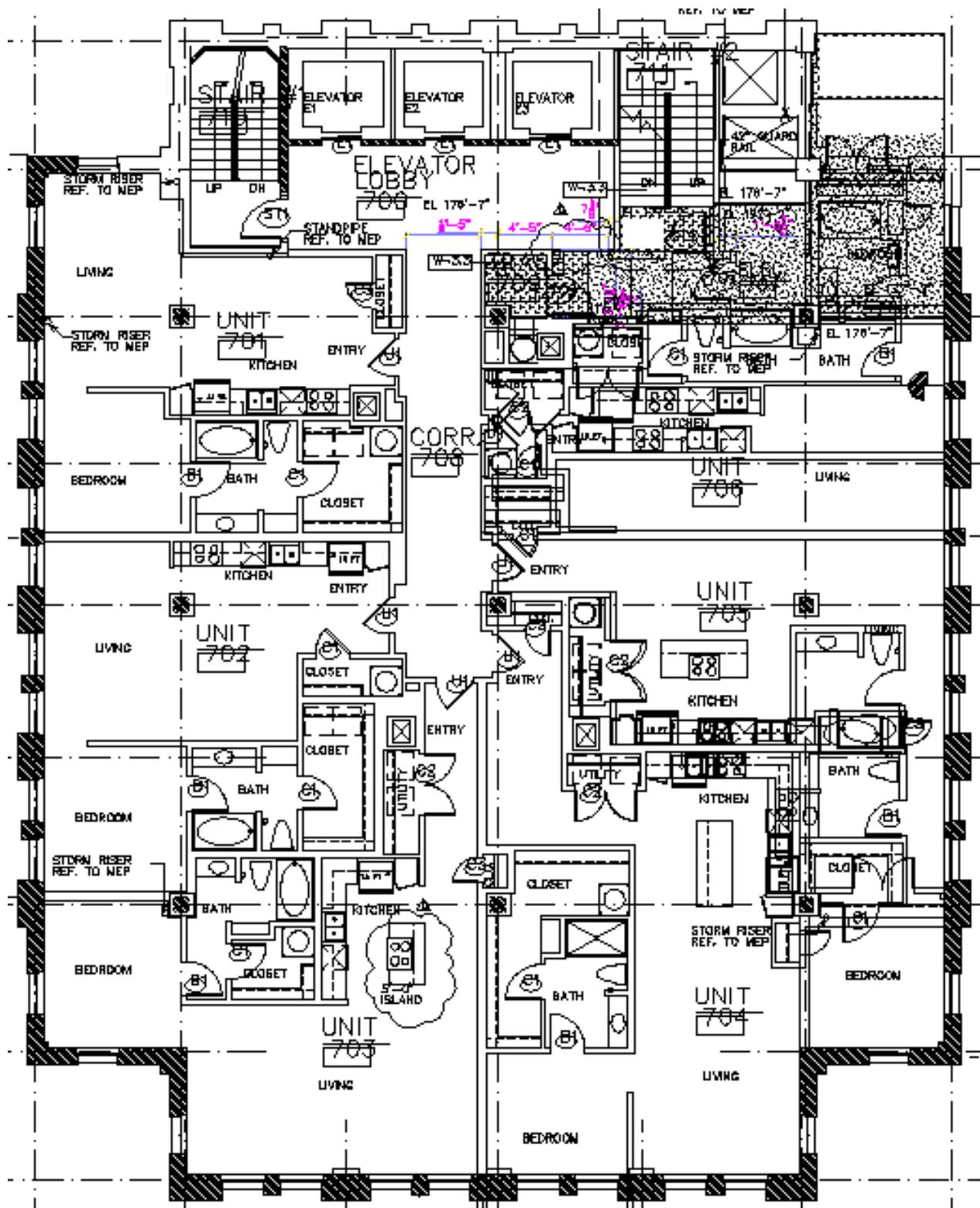
## APÊNDICE A – SELEÇÃO DOS VENTILADORES

As máquinas internas, unidades evaporadoras, devem ser dimensionadas levando-se em consideração a sua eficiência. Para tanto surge a necessidade de consultar o catálogo do fabricante para obter informações como eficiência total do conjunto, potência do motor do ventilador, e vazão de insuflamento. Estes parâmetros serão utilizados na equação A.1 para a obtenção da diferença de pressão do ventilador.

$$\Delta P = P \times \frac{\eta}{\dot{V}} \quad \text{A.1}$$

Onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão do ventilador (Pa),  $P$  é a potência do motor (W),  $\eta$  é eficiência do conjunto moto-ventilador e  $\dot{V}$  é a vazão do ventilador (m<sup>3</sup>/s). A vazão e potência do motor foram utilizadas conforme catálogo e a eficiência o constante como padrão no *software* EnergyPlus. Para o modelo do evaporador empregado no VRF (APO274H-E), obteve-se  $\Delta P = 114 Pa$ . Para o evaporador da máquina Split (42LUQC22C5), não foram encontrados os dados de potência do motor do ventilador. Como as máquinas evaporadoras são aproximadamente iguais, assumiu-se a mesma diferença de pressão para este caso.

APÊNDICE B – PLANTA BAIXA DO PRÉDIO



APÊNDICE B – Planta baixa de 6º pavimento.

## APÊNDICE C – MATERIAIS E PROPRIEDADES TÉRMICAS

Tabela C.1 – Características construtivas

Superfície	Ordem	Material	l [m]	k [W/m.k]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kg.K]
Janelas	-	Vidro Simples	0,0030	0,9	-	-
Porta Externa	-	Madeira	0,0508	0,15	608	1630
Porta Interna	-	Madeira	0,0254	0,15	608	1630
Paredes Externas	1	Argamassa e Reboco	0,0254	0,72	1856	840
	2	Tijolo	0,2000	0,89	1920	790
	3	Argamassa e Reboco	0,0254	0,72	1856	840
Paredes Internas	1	Argamassa e Reboco	0,0254	0,72	1856	840
	2	Tijolo	0,1016	0,89	1920	790
	3	Argamassa e Reboco	0,0254	0,72	1856	840
Piso do Térreo	1	Solo	0,3000	0,7	1285	840
	2	Concreto	0,2032	1,95	2240	900
Piso do Terraço	1	Concreto leve	0,1524	0,53	1280	840
Piso Interno	1	Concreto leve	0,1524	0,53	1280	840
Forro Interno	1	Concreto leve	0,1524	0,53	1280	840

Tabela D.1 – Dias de projeto utilizados na simulação.

Dias de Projeto										
Região	Porto Alegre									
Período	Inverno			Verão						
Corte de 0,4%	Em TBS de inverno	Em conteúdo de umidade	Em velocidade do vento	Em TBS de verão	Em TBU de verão	Em conteúdo de umidade	Em entalpia			
Mês	Julho	Julho	Julho	Janeiro	Janeiro	Janeiro	Janeiro			
Dia do Mês	21	21	21	21	21	21	21			21
Dia Típico	Dia de projeto de inverno	Dia de projeto de inverno	Dia de projeto de inverno	Dia de projeto de verão			Dia de projeto de verão			
TBS <sub>max</sub>	4,1°C	8,7°C	11,3°C	34,9°C	31,6°C	28,3°C	31,7°C			
Varição na TBS	0°C	0°C	0°C	9,8°C	9,8°C	9,8°C	9,8°C			
Tipo de Condição de Umidade	Bulbo úmido	Ponto de orvalho	Bulbo úmido	Bulbo úmido	Bulbo úmido	Ponto de orvalho	Entalpia			
Bulbo Úmido ou Ponto de Orvalho Máximo de Bulbo Seco	4,1°C	1,2°C	11,3°C	24,6°C	26,3°C	25°C	-			
Entalpia Máxima de Bulbo Seco	-	-	-	-	-	-	81800 J/kg			
Velocidade do Vento	1 m/s	1 m/s	10,1 m/s	3,4 m/s	3,4 m/s	3,4 m/s	3,4 m/s			
Pressão Barométrica	101289 Pa	101289 Pa	101289 Pa	101289 Pa	101289 Pa	101289 Pa	101289 Pa			
Indicador de Modelo de Energia Solar	Céu aberto	Céu aberto	Céu aberto	Céu aberto	Céu aberto	Céu aberto	Céu aberto			Céu aberto