

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

IMPACTO DAS SOLUÇÕES DE ARQUITETURA E CLIMATIZAÇÃO NO CONSUMO DE
ENERGIA DE UMA EDIFICAÇÃO

por

Tiago Silva Stein

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, Julho de 2011



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

IMPACTO DAS SOLUÇÕES DE ARQUITETURA E CLIMATIZAÇÃO NO CONSUMO DE
ENERGIA DE UMA EDIFICAÇÃO

por

Tiago Silva Stein

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. Jorge R. S. Zabadal DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey DEMEC/UFRGS

Porto Alegre, 1º de Julho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha namorada *Camila*, por toda ajuda, carinho e compreensão nos momentos fáceis e difíceis

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer*, pelos conhecimentos transmitidos e ajuda nesta importante etapa

aos meus pais, pelo carinho e por incentivar a minha educação

aos colegas de faculdade e amigos, por todo o apoio

às empresas Senco e Artetec, pela oportunidade de realizar estágio

Um pessimista vê uma dificuldade em cada oportunidade;
um otimista vê uma oportunidade em cada dificuldade.

Winston Churchill

STEIN, T. S. **Impacto das Soluções de Arquitetura e Climatização no Consumo de Energia de uma Edificação**. 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Em vista da necessidade de redução do consumo de energia em edificações, busca-se neste trabalho a avaliação termo-energética de uma edificação situada na cidade de Porto Alegre, por meio da análise do consumo energético do sistema de ar condicionado. Para isto, utilizou-se a ferramenta de simulação computacional *EnergyPlus*. Foi declarado para o programa todos os dados referentes à edificação existente, como sua envoltória e sistema de climatização. A partir disso foram propostas alterações arquitetônicas, tais como substituição dos vidros existentes por vidros térmica e energeticamente mais eficientes e alteração do sistema de climatização de água gelada para Fluxo de Refrigerante Variável (VRF). Para a obtenção de uma simulação mais próxima da realidade foram utilizados dados obtidos de catálogos de fabricantes e ajustando as curvas das mesmas. Concluiu-se que é possível conseguir uma redução significativa de energia em edificações, aplicando alterações de arquitetura e climatização, acarretando em um menor impacto ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência termo-energética, sistema de ar condicionado VRF, Água Gelada, *EnergyPlus*.

STEIN, T. S. **Impact of Solutions of Architecture and Air Conditioning Energy Consumption of a Building.** 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

Looking for the need to reduce energy consumption in buildings, this study evaluate the thermo energetic efficiency of a building located in Porto Alegre, through the analysis of energy consumption of air conditioning system. For this, we used a computational simulation tool EnergyPlus. Was declared for the program all data related to existing building, as its envelope and HVAC system. From this architectural changes have been proposed, such as replacement of existing glass windows for heat and more energy efficient and climate change of the chilled water system for Variable Refrigerant Flow (VRF). To obtain a simulation closer to reality we used data obtained from manufacturer catalogs and adjusting the curves of the same. It was concluded that it is possible to significantly reduce energy in buildings by applying architectural changes and cooling, resulting in a lower environmental impact.

KEYWORDS: Thermal energy efficiency, air conditioning system VRF, Chilled water, *EnergyPlus*.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL	1
3.1. <i>GOOGLE SKETCHUP</i>	1
3.2. OPEN STUDIO	1
3.3. <i>ENERGYPLUS</i>	2
3.4. VARIÁVEIS DE ENTRADA	2
3.5. ARQUIVO CLIMÁTICO	2
3.6. DIAS DE PROJETO	3
3.7. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA	3
3.8. DADOS DE SAÍDA	3
4. SISTEMA DE AR CONDICIONADO FLUXO DE REFRIGERANTE VARIÁVEL (VRF)	4
4.1. DEFINIÇÃO	4
4.2. ACOPLAGEM DO SISTEMA VRF AO ENERGYPLUS	4
4.3. CORRELAÇÕES DE DESEMPENHO	4
4.3.1. Correlações de Desempenho para Refrigeração	4
4.3.2. Correlações de Desempenho para Aquecimento	5
5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	5
5.1. EDIFICAÇÃO	5
5.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	6
5.3. CARGAS INTERNAS	7
5.3.1. Pessoas	7
5.3.2. Equipamentos	7
5.3.3. Iluminação Interna e Externa	8
5.3.4. Infiltração	8
5.4. CRONOGRAMA DE UTILIZAÇÃO E OCUPAÇÃO DO PRÉDIO	8
5.5. SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO EXISTENTE	8
6. ANÁLISES E RESULTADOS	8
6.1. PRÉDIO EXISTENTE	9
6.2. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS	9
6.2.1. Troca do Sistema de Climatização para VRF	9
6.2.2. Controle de Iluminação Natural	10
6.2.3. Substituição dos Vidros	10

6.3. COMPARAÇÃO ENTRE PRÉDIO BASE E PRÉDIO MODIFICADO	11
7. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS	14
ANEXO A	16
ANEXO B	17
APÊNDICE A	18

1. INTRODUÇÃO

A busca por edifícios ambientalmente mais adequados e eficientes, no que diz respeito a consumo de energia, está cada vez maior (Neto, 2011). Segundo o Ministério de Minas e Energia, 2009, até 2030 haverá um aumento de pelo menos 87% na demanda de energia, logo se justifica a busca por redução do consumo de energia em prédios existentes.

A partir disso, verifica-se que o uso da simulação de edificações realizada com o *EnergyPlus*, possibilita demonstrar que é possível melhorar a eficiência térmica e energética em edificações, bem como apontar os responsáveis pelo maior gasto de energia, conforme diversos estudos já realizados.

Assim, a simulação da edificação mostra-se como uma importante ferramenta na busca de soluções para a redução do consumo de energia, justificando a relevância deste estudo. Por isto, este trabalho teve o objetivo de avaliar termo-energicamente uma edificação situada na cidade de Porto Alegre, buscando um cenário de menor consumo de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Carvalho, 2009, analisou o custo energético anual em uma edificação em Porto Alegre. Ele demonstrou que com simples alterações arquitetônicas, foi possível melhorar a eficiência térmica e energética desta edificação. Para chegar a essas conclusões, foram feitas simulações em dias de projeto da edificação, utilizando o programa *EnergyPlus*.

Pereira, 2005, apresentou a influência de parâmetros físicos no desempenho termo-energético de uma edificação. Este autor e Carvalho, 2009, mostraram que a utilização de vidros mais eficientes no ponto de vista termo-energético, altera tanto a potência requerida pelo sistema de condicionamento de ar, quanto o consumo elétrico anual da edificação.

Boeno, 2010, realizou a comparação do sistema de Fluxo de Refrigerante Variável (VRF) com o sistema de Água Gelada, visando à eficiência energética de ambos, aplicado em um prédio histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para a aquisição do modelo tridimensional da edificação, foram utilizados o programa *Google SketchUp* em conjunto com o *plugin Open Studio*. Após, simulou-se a edificação com auxílio do programa *EnergyPlus*.

3.1. 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.

3.2. OPEN STUDIO

É um *plugin* que permite a utilização das ferramentas do *Google Sketchup* para a criação de zonas e superfícies utilizadas pelo *EnergyPlus*. Ele proporciona a exploração dos arquivos de entrada do *EnergyPlus*, utilizando os recursos do *Google Sketchup*, possibilitando a visão geométrica de qualquer ponto de vista, aplicação de diversos tipos de renderização e 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 1.0.6, podendo ser adquirido gratuitamente na página do DOE.

3.3. ENERGYPLUS

Este programa computacional permite avaliar o comportamento termo-energético de uma edificação, através da análise de diversos parâmetros que influenciam sua dinâmica térmica, como a temperatura operativa dos ambientes, fluxo de calor através das superfícies envoltórias, bem como permitir a utilização de diferentes sistemas de ar condicionado. A ferramenta possibilita analisar o consumo energético total da edificação. O *EnergyPlus* está na versão 6.0.

3.4. VARIÁVEIS DE ENTRADA

Inicialmente, desenvolve-se no *Google Sketchup* em conjunto com o *plugin Open Studio*, toda a envoltória da edificação, ou seja, todas as superfícies constituintes do modelo, como paredes, pisos, forros, portas e janelas. Para a simulação, divide-se a edificação em diversas zonas térmicas. Estas zonas térmicas são formadas por ambientes que apresentam um mesmo regime de utilização e um mesmo perfil de carga térmica, segundo ABNT 2008.

Depois de declarada toda a geometria da edificação, são especificadas, no *EnergyPlus*, as características de cada superfície que a constitui, como espessura, densidade, calor específico e condutividade térmica.

Por fim, informam-se as cargas internas da edificação, como número de pessoas, equipamentos, iluminação e infiltrações.

3.5. ARQUIVO CLIMÁTICO

Para avaliar o consumo energético anual da edificação, incluindo iluminação, sistema de ar condicionado e equipamentos elétricos, utiliza-se o arquivo climático, composto por uma medição horária anual de diversos dados meteorológicos – temperatura, umidade, velocidade e direção do vento, radiação solar – por um período superior a dez anos.

A montagem estatística destes dados é realizada de duas maneiras: *Test Meteorological Year (TMY)* e *Test Reference Year (TRY)*. No arquivo *TMY*, são escolhidos os meses mais representativos durante o período medido, resultando em um ano formado por meses diferentes, ou seja, um ano que nunca existiu. Já no arquivo *TRY*, é escolhido o ano mais expressivo entre todos os anos medidos.

O arquivo climático para a cidade de Porto Alegre utilizado neste trabalho foi obtido através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE, 2011. Este é um arquivo próprio para o *EnergyPlus*, apresentando o formato *EPW (EnergyPlus Weather)*.

A Figura 3.1 mostra a evolução da temperatura de bulbo seco para Porto Alegre durante o ano.

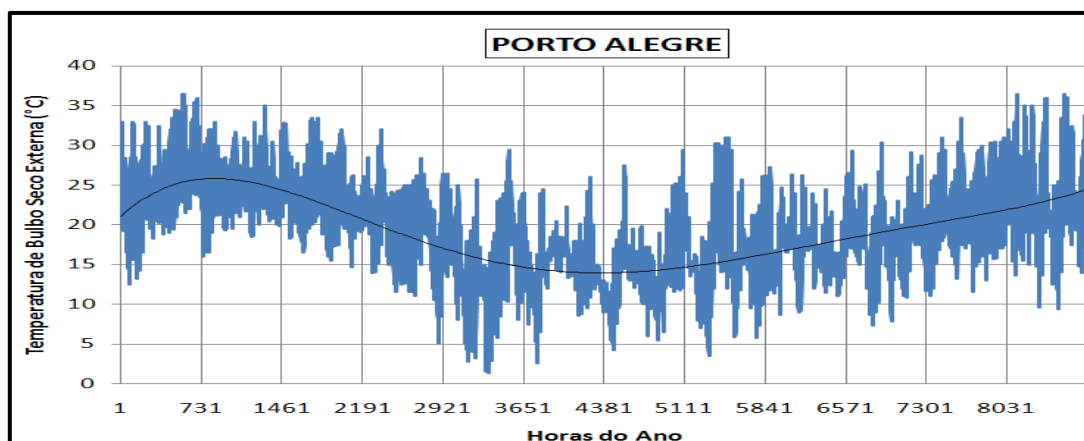


Figura 3.1 – Evolução Anual da Temperatura de Bulbo Seco externa para Porto Alegre.

3.6. DIAS DE PROJETO

Para o dimensionamento de sistemas de ar condicionado, utilizam-se os dias de projeto definidos pela ASHRAE, 2005.

Entre os valores apresentados nos dias de projeto, estão a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, claridade do céu, entre outros.

Para os dias de projeto de verão, utilizam-se índices que possuem os dados obtidos nas condições de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e umidade. Estes valores apresentam ocorrências cumulativas anuais de 0,4, 1,0 e 2,0 % das 8760 horas do ano, isto é, o sistema de ar condicionado não conseguirá manter a temperatura média do ar ambiente na temperatura de controle definida pelo termostato abaixo da frequência de ocorrência cumulativa escolhida para o dia de projeto. Logo, dependendo da frequência cumulativa anual escolhida, 0,4, 1,0 e 2,0 %, o sistema de ar condicionado não atenderá, respectivamente, 35, 88 e 175 horas anuais a temperatura média da zona climatizada.

Nos dias de projeto de inverno, as frequências cumulativas anuais nas quais as temperaturas de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e umidade ocorrem, são de 99 e 99,6% das 8760 horas do ano. Portanto, o sistema de ar condicionado não conseguirá atender a temperatura média do ar ambiente na temperatura de controle definida pelo termostato acima da frequência de ocorrência cumulativa escolhida para o dia de projeto.

Nas simulações realizadas neste trabalho, adotou-se a temperatura de controle do termostato, para o verão, de 25°C e para o inverno de 22°C.

3.7. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA

O equacionamento para o balanço de energia das zonas térmicas utilizado pelo EnergyPlus apresenta a seguinte forma:

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} - T_Z + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} m c_p T_{si} - T_Z + m_{inf} c_p T_{\infty} - T_Z + m_{sist} c_p T_{si} - T_Z \quad (3.1)$$

onde $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada na zona térmica em (W), $\sum_{i=1}^{N_{si}} Q_i$ é o somatório das cargas internas do ambiente em (W), $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} - T_Z$ é a taxa de calor devido a convecção através das superfícies da zona térmica em (W), $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} m c_p T_{si} - T_Z$ é o somatório das taxas de calor provenientes de outras zonas em (W), $m_{inf} c_p T_{\infty} - T_Z$ é a taxa de calor proveniente da infiltração de ar externo na zona em (W), $m_{sist} c_p T_{si} - T_Z$ é a taxa de calor fornecida pelo sistema de ar condicionado a zona em (W).

3.8. DADOS DE SAÍDA

O *EnergyPlus* pode gerar diversos arquivos e variáveis de saída que contém as informações obtidas das simulações realizadas com o modelo proposto. Contudo, os dados de saída são definidos pelo usuário de acordo com sua necessidade. O programa pode ainda gerar relatórios de consumo, anual e mensal, para toda a edificação, assim como o consumo individual imposto pelos sistemas presentes.

Nas simulações deste trabalho, foram solicitadas as variáveis de saída necessárias para o dimensionamento do novo sistema de ar condicionado imposto ao prédio, que são: a potência de refrigeração e aquecimento, a vazão de ar, a temperatura e as horas não atendidas pelo sistema de ar condicionado.

Para análise de consumo, foram solicitados os relatórios referente ao consumo de toda a edificação, os relatórios de consumo individual imposto pelo sistema de ar condicionado, iluminação interna e externa e equipamentos.

4. SISTEMA DE AR CONDICIONADO FLUXO DE REFRIGERANTE VARIÁVEL (VRF)

Neste trabalho optou-se por utilizar o sistema VRF como substituto do sistema de Água Gelada existente na edificação, pelo fato ser um sistema compacto e eficiente (Carotenuto, 2009). Utilizou-se os manuais técnicos fornecidos pelo fabricante, (Daikin, 2006) que fornecem os dados necessários para simulações no *EnergyPlus*.

4.1. DEFINIÇÃO

O sistema VRF, conforme a ABNT, 2008, é constituído por um conjunto de unidades de tratamento de ar de expansão direta, instaladas dentro do ambiente a que servem, controladas e operadas independentemente uma da outra, que são supridas por fluido refrigerante em vazão variável por uma unidade condensadora central, instalada externamente.

4.2. ACOPLAGEM DO SISTEMA VRF AO ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* ainda não possui um módulo que represente o sistema VRF pelo fato de suas equações não permitirem que o sistema opere em regime parcial de potência de refrigeração e aquecimento com fluxo variável de refrigerante.

Neste estudo, tendo como referência Carotenuto, 2009, emprega-se o módulo do *EnergyPlus* com sistema de ar condicionado com ciclo reverso e serpentina de expansão direta, corrigindo as correlações de desempenho das unidades condensadoras para uma vazão de refrigerante constante e regime de carga em 100% da potência de aquecimento e refrigeração, conforme catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

4.3. CORRELAÇÕES DE DESEMPENHO

Conforme consta no manual do *EnergyPlus*, são utilizadas cinco correlações de desempenho para as variações da capacidade de refrigeração e aquecimento e para a eficiência da máquina de ar condicionado. Para adequação ao sistema VRF, foi utilizado neste trabalho as correlações de capacidade de refrigeração e aquecimento em função da temperatura e as correlações da potência elétrica de refrigeração e aquecimento em função da temperatura.

4.3.1. Correlações de Desempenho para Refrigeração

A correlação de desempenho da capacidade de refrigeração é uma correlação biquadrática em função da temperatura de bulbo seco externa e da temperatura de bulbo úmido interna. Esta correlação apresenta seguinte forma:

$$F_{CR} = a + b T_{bu_{int}} + c T_{bu_{int}}^2 + d(T_{bs_{ext}}) + e T_{bs_{ext}}^2 + f T_{bu_{int}} T_{bs_{ext}} \quad (4.1)$$

onde F_{CR} corresponde ao fator de correção da capacidade de refrigeração, $T_{bu_{int}}$ é a temperatura de bulbo úmido do ar interior em (°C), $T_{bs_{ext}}$ é a temperatura de bulbo seco do ar exterior em (°C) e a , b , c , d , e e f , são os coeficientes da equação biquadrática.

Estes coeficientes são obtidos através de regressão polinomial por mínimos quadrados, utilizando as tabelas de desempenho da capacidade de refrigeração da unidade condensadora, fornecidas pelo catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

A correlação de desempenho da potência elétrica de refrigeração é uma correlação biquadrática em função da temperatura de bulbo seco externa e da temperatura de bulbo úmido interna. Esta correlação apresenta seguinte forma:

$$F_{ER} = a + b T_{bu_{int}} + c T_{bu_{int}}^2 + d(T_{bs_{ext}}) + e T_{bs_{ext}}^2 + f T_{bu_{int}} T_{bs_{ext}} \quad (4.2)$$

onde F_{ER} é o fator de correção da potência elétrica de refrigeração, Tbu_{int} é a temperatura de bulbo úmido do ar interior em (°C), Tbs_{ext} é a temperatura de bulbo seco do ar exterior em (°C) e a , b , c , d , e e f , são os coeficientes da equação biquadrática, obtidos por regressão polinomial por mínimos quadrados, utilizando as tabelas de desempenho da capacidade de refrigeração da unidade condensadora, fornecidas pelo catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

4.3.2. Correlações de Desempenho para Aquecimento

A correlação de desempenho da capacidade de aquecimento é uma correlação cúbica, em função da temperatura de bulbo seco do ar exterior. Esta correlação apresenta a seguinte forma:

$$F_{CA} = a + b Tbs_{ext} + c Tbs_{ext}^2 + d Tbs_{ext}^3 \quad (4.3)$$

onde F_{CA} corresponde ao fator de correção da capacidade de aquecimento, Tbs_{ext} é a temperatura de bulbo seco do ar exterior em (°C) e a , b , c e d são os coeficientes da equação cúbica, sendo obtidos através de regressão polinomial por mínimos quadrados, utilizando as tabelas de desempenho para capacidade de aquecimento da unidade condensadora, encontradas no catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

A correlação de desempenho da potência elétrica de aquecimento é uma correlação cúbica em função da temperatura de bulbo seco externa. Esta correlação apresenta seguinte forma:

$$F_{EA} = a + b Tbs_{ext} + c Tbs_{ext}^2 + d Tbs_{ext}^3 \quad (4.4)$$

onde F_{EA} corresponde ao fator de correção da potência elétrica de aquecimento, Tbs_{ext} é a temperatura de bulbo seco do ar exterior em (°C) e a , b , c e d são os coeficientes da equação cúbica, sendo obtidos através de regressão polinomial por mínimos quadrados, utilizando as tabelas de desempenho para capacidade de aquecimento da unidade condensadora, encontradas no catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Neste item, informa-se a os principais parâmetros de análise da edificação simulada. São especificados: o modo de zoneamento, as características construtivas e térmicas das superfícies, as fontes internas geradoras de calor, o perfil de utilização do prédio por pessoas, equipamentos e iluminação, bem como o sistema de climatização existente no prédio.

5.1. EDIFICAÇÃO

A edificação estudada neste trabalho situa-se na cidade de Porto Alegre, RS. Ela possui doze pavimentos, sendo dois deles subsolo e sua envoltória é constituída em sua maior parte por vidros. Na Figura 5.1 pode ser feita uma comparação entre a edificação real e a edificação criada no *Open Studio*, com as ferramentas do *Google SketchUp*.

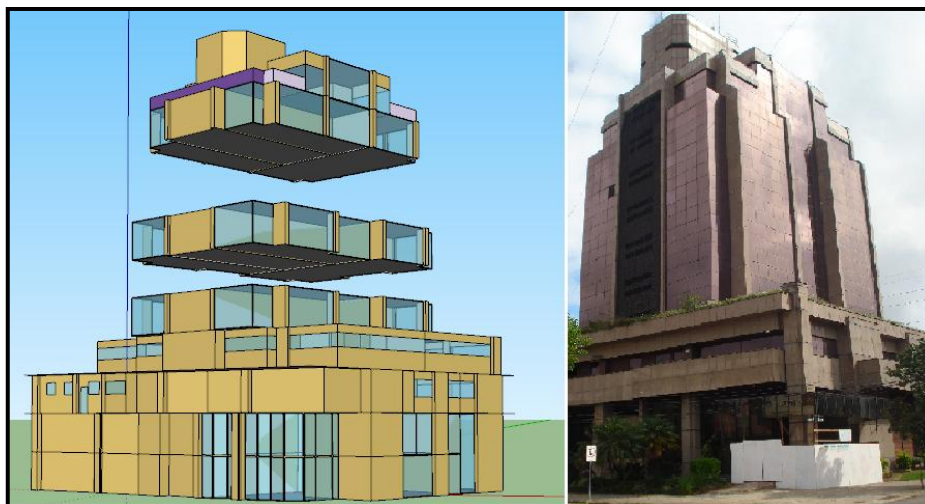


Figura 5.1 – Comparação entre o prédio criado e o prédio real.

Para fins de simulação a edificação foi dividida em 33 zonas térmicas, que segundo a ABNT, 2008, é o grupo de ambientes com mesmo regime de utilização e mesmo perfil de carga térmica, permitindo que as condições requeridas possam ser mantidas com um único dispositivo de controle ou atendidas por apenas um equipamento condicionador destinado àquela zona. Destas 33 zonas, doze foram consideradas como não climatizadas, por se tratarem de zonas de circulação, elevadores e de pouca ocupação, conforme pode ser verificado no Apêndice A.

Observa-se na Figura 5.1 um espaçamento entre os pavimentos. Isto se deve ao fato de que a edificação não foi simulada na forma contínua. Em virtude de o prédio apresentar quatro pavimentos tipo, declarou-se um pavimento ao *EnergyPlus* e multiplicou-o por quatro. O programa aceita este tipo de ação, através da declaração de um multiplicador nos dados de entrada.

5.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Os elementos de construção como paredes externas e internas, pisos externos e internos, forros, coberturas, janelas e portas são mostrados na Tabela 5.1, assim como suas principais propriedades termofísicas. Esses materiais e suas propriedades são encontrados no banco de dados do programa e seguem as recomendações da ASHRAE, 2005.

Tabela 5.1 – Caracterização das superfícies que constituem a edificação.

Superfícies	Camada	Material	L (mm)	K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	R (m ² .K/W)	C _p (J/kg.K)
Paredes externas	01	Granito lixado/polido	13	4,3	2880	-	790
	02	Reboco	10	0,72	1601	-	830
	03	Concreto (areia e cascalho)	150	1,29	2242	-	830
	04	Reboco	10	0,72	1601	-	830
Paredes internas	01	Placa de gesso	20	0,16	784	-	830
	02	Espaço de ar parado para o lado	90	-	-	0,16	-
	03	Placa de gesso	20	0,16	784	-	830

Piso externo	01	Lajota interior	10	1,8	1922	-	830
	02	Concreto (areia e cascalho)	150	1,29	2242	-	830
Piso interno	01	Placa de gesso	20	0,16	784	-	830
	02	Espaço de ar parado para cima	200	-	-	0,11	-
	03	Concreto (areia e cascalho)	150	1,29	2242	-	830
	04	Lajota interior	10	1,8	1922	-	830
Forro interno	01	Lajota interior	10	1,8	1922	-	830
	02	Concreto (areia e cascalho)	150	1,29	2242	-	830
	03	Espaço de ar parado para baixo	200	-	-	0,16	-
	04	Placa de gesso	20	0,16	784	-	830
Cobertura	01	Lajota exterior	20	1,79	1922	-	1040
	02	Concreto (areia e cascalho)	150	1,29	2242	-	830
	03	Placa de gesso	20	0,16	784	-	830
Portas	01	Vidro bronze	6	0,9	-	-	-
Janelas	01	Vidro com película reflexiva	6	0,9	-	-	-

onde L é a espessura do material, K a condutividade térmica do material, ρ é a massa específica do material, R a resistência térmica do material e C_p é o calor específico do material.

5.3. CARGAS INTERNAS

As cargas internas correspondem a fontes geradoras de calor e umidade que são liberados para o ambiente. Essas fontes internas geradoras de calor e umidade são atribuídas às pessoas, equipamentos, iluminação e infiltração.

5.3.1. Pessoas

Para a determinação da quantidade de pessoas presentes em cada zona, foram utilizadas as plantas baixas de arquitetura de interiores, onde se pode visualizar os postos de trabalho, atribuindo um ocupante para cada posto. As plantas de arquitetura de interiores podem ser visualizadas no Anexo A.

5.3.2. Equipamentos

Os equipamentos elétricos são responsáveis por aumentar a carga térmica do ambiente devido a sua dissipação de calor. Em prédios de escritórios, os equipamentos mais comuns são os computadores, os monitores, as impressoras e as cafeteiras. Consultando-se as plantas de arquitetura de interiores, foi possível determinar os equipamentos existentes no prédio através de contagem simples dos mesmos em planta, conforme Anexo A. A taxa de dissipação de calor considerada nos equipamentos segue a recomendação da ABNT, 2008, e pode ser vista na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Taxa de Dissipação de Calor de Equipamentos (ABNT, 2008).

Equipamentos	Taxas de Dissipação (W)
Computadores	65
Monitores (16 pol. a 18 pol.)	70
Impressoras de escritório	320
Cafeteiras	1500

Acrescentou-se ainda o acréscimo da carga dos dois elevadores do prédio, tendo cada um o valor de 5 kW.

5.3.3. Iluminação Interna e Externa

A taxa de iluminação interna seguiu a recomendação da ASHRAE, 2007, que estabelece para escritórios, um valor 12 W/m². Para a iluminação externa das fachadas e circulação, considerou-se a utilização de 2500 W.

5.3.4. Infiltração

Considerou-se para todas as zonas climatizadas da edificação 0,5 trocas por hora, excetuando-se as zonas centrais do térreo e mezanino, que foram consideradas 0,25 trocas por hora. Já para as zonas não climatizadas, foi considerada uma troca por hora. Todas as infiltrações obedecem às recomendações da ASHRAE.

5.4. CRONOGRAMA DE UTILIZAÇÃO E OCUPAÇÃO DO PRÉDIO

Para efetuar a simulação informa-se ao programa um perfil horário de ocupação e utilização do prédio. Nesse perfil constam os períodos de ocupação do prédio por pessoas, a utilização dos equipamentos, o período de uso de iluminação e o uso do equipamento de ar condicionado. No programa, esse cronograma é representado de forma numérica, sendo atribuído 0 para o valor mínimo e 1 para o valor máximo. Essa descrição é feita para todos os dias da semana, durante 24 horas, estabelecendo-se exceções para fins de semana e feriados.

5.5. SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO EXISTENTE

Com a finalidade de obter uma simulação o mais possível próximo da realidade, foram levantados os dados referentes ao sistema de climatização existente. Com informações obtidas dos responsáveis pela edificação, foram declarados no programa os dados referentes as torres de resfriamento, as bombas e ventiladores do sistema, bem como o *Chiller* que se encontra no prédio. Como o *EnergyPlus* possui um banco de dados de diferentes tipos de *Chiller*, foi possível utilizar um dos encontrados no programa que tinha a maior semelhança com o existente. Para fins de manter a edificação simulada o mais próximo da edificação real, foi corrigido a capacidade de operação e a capacidade de refrigeração do *Chiller* escolhido. Como o programa não possibilita o uso de *Chillers* em modo de ciclo reverso, foi declarado um sistema de aquecimento em separado. Para tanto, foi acoplado na simulação um *boiler* elétrico, que fornecerá, quando solicitado, a carga de aquecimento ao sistema.

6. ANÁLISES E RESULTADOS

Para fins de análise, serão apresentadas as modificações propostas na edificação com o objetivo da redução do consumo de energia da mesma.

6.1. PRÉDIO EXISTENTE

Após informar todas as características da edificação existente, ela foi simulada no *EnergyPlus*, obtendo-se seus dados de consumo. O consumo anual da edificação é de 517.590 kW.h/ano. Para uma melhor compreensão do trabalho, a edificação existente foi denominada Prédio Base.

A maior contribuição no gasto de energia do Prédio Base é a iluminação, com 145.947 kW.h/ano, seguido pela refrigeração, com 90.118 kW.h/ano e os equipamentos, com 103.201 kW.h/ano.

6.2. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

Com a intenção de reduzir o gasto com energia elétrica do Prédio Base, foram propostas algumas modificações, indicadas a seguir.

6.2.1. Troca do Sistema de Climatização para VRF

Optou-se pela troca do sistema de climatização de água gelada por VRF, pelo fato de ser um sistema mais eficiente, conforme Carotenuto, 2009.

Para o dimensionamento das unidades condicionadoras, primeiramente se fez simulações com o objetivo de obter as máximas potências de refrigeração para cada zona térmica, utilizando-se o arquivo climático e os dias de projeto para Porto Alegre. Este processo foi consolidado com os dados de entrada no programa, relacionados ao ar condicionado, deixados em *autosize*, admitindo que o programa dimensionasse máquinas virtuais. A rotina de seleção das unidades do sistema VRF seguiu o proposto por Carvalho, 2009, e pode ser visualizada na Figura B.1, do Anexo B.

A partir de obtidas as cargas térmicas através da simulação, selecionam-se as unidades evaporadoras através do catálogo do fabricante (Daikin, 2006). Para a seleção das condensadoras, as zonas térmicas foram agrupadas em quatro grupos: Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3 e Grupo 4. O Grupo 1 é composto pelo térreo, mezanino e segundo pavimento. O Grupo 2 é formado pelo terceiro e quarto pavimentos. O pavimento tipo constitui o Grupo 3. O Grupo 5 é composto pelo nono pavimento e a cobertura. A Tabela 6.1 mostra as evaporadoras selecionadas para o prédio.

Tabela 6.1 – Unidades evaporadoras selecionadas para cada zona térmica a partir do catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

Zona	Modelo	Quantidade	Carga Térmica Calculada (W)	Capacidade de Refrigeração (W)	Vazão (L/s)
Térreo-OSO	FXFQ32PVE	2	7345	3700	217
Térreo-Centro	FXFQ40PVE	2	9314	4700	250
Térreo-NNO	FXFQ63PVE	3	21481	7300	317
Térreo-ENE	FXFQ80PVE	1	9039	9300	350
Mez-Centro	FXFQ100PVE	1	11006	11600	533
2 Pav-NNO	FXFQ32PVE	1	3324	3700	217
2 Pav-ENE	FXFQ100PVE	2	19132	11600	533
2 Pav-OSO	FXFQ100PVE	1	10075	11600	533
3 Pav-ENE	FXFQ80PVE	1	8434	9300	350
3 Pav-OSO	FXFQ100PVE	1	10873	11600	533

3 Pav-NNO	FXFQ100PVE	6	62162	11600	533
4 Pav-ENE	FXFQ125PVE	1	11863	14500	550
4 Pav-NNO	FXFQ125PVE	2	26241	14500	550
4 Pav-OSO	FXFQ80PVE	2	16828	9300	350
Tipo-ENE	FXFQ100PVE	4	38075	11600	533
Tipo-OSO	FXFQ125PVE	4	55513	14500	550
Tipo-NNO	FXFQ125PVE	8	94088	14500	550
9 Pav-NNO	FXFQ80PVE	2	17934	9300	350
9 Pav-ENE	FXFQ100PVE	1	11049	11600	533
9 Pav-OSO	FXFQ125PVE	1	13328	14500	550
Cobertura	FXFQ100PVE	2	18984	11600	533

A Tabela 6.2 mostra as unidades condensadoras selecionadas para o prédio. A seleção da unidade externa de cada grupo, leva em conta a soma das cargas térmicas calculadas que compõem o grupo.

Tabela 6.2 – Capacidades de refrigeração para as condensadoras selecionadas a partir do catálogo do fabricante (Daikin, 2006).

Grupo	Modelo	Quantidade	Carga Térmica Calculada (W)	Capacidade de Refrigeração (W)	Coefficiente de Desempenho (COP)
1	RXYQ34PAHY1	1	90900	95600	3,68
2	RXYQ50PAHY1	1	136400	140000	3,1
3	RXYQ34PAHY1	2	187700	191200	3,68
4	RXYQ24PAHY1	1	61300	67600	4,28

6.2.2. Controle de Iluminação Natural

Para fins de diminuir o consumo energético da edificação e por se tratar de um prédio que possui uma grande área envidraçada, decidiu-se pelo uso de um controle de iluminação natural. Para a simulação, são declarados dois pontos de controle por zona. Para cada espaço de tempo, o programa calcula o quanto de iluminação natural está no interior da zona e em seguida determina o quanto a iluminação elétrica pode ser reduzida, utilizando como iluminação interna na zona, um misto de luz natural e luz elétrica (*EnergyPlus*,2011).

Este controle foi declarado nas zonas do quarto pavimento, pavimento tipo, nono pavimento e cobertura, por se tratarem das maiores áreas envidraçadas da edificação.

6.2.3. Substituição dos Vidros

Na escolha dos vidros para a substituição na edificação foram estabelecidos alguns critérios: manter as características da fachada do prédio, escolha de vidros termicamente mais eficientes e o grau de transmissão luminosa do vidro. Neste sentido, procurou-se no catálogo do fabricante (Guardian, 2011) os vidros que satisfaziam aos critérios. A partir disso, foram escolhidos cinco modelos de vidro, apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Vidros escolhidos no catálogo do fabricante (Guardian, 2011).

	Aparência	Espessura	U (W/m ² °C)	Transmissão Luminosa (%)	Coefficiente de Ganho de Calor Solar (%)	Luz por Ganho de Calor
Vidros Laminados						
Vidro 1	Prateado	4mm / PVB 0,38mm / 4mm	5,16	47	39	1,20
Vidro 2	Cinza	4mm / PVB 0,38mm / 4mm	5,16	29	37	0,78
Vidros Duplos						
Vidro 3	Prateado	6mm / ar 12mm / 6mm	1,68	49	35	1,42
Vidro 4	Cinza	6mm / ar 12mm / 6mm	1,62	49	30	1,63
Vidro 5	Claro	6mm / ar 12mm / 6mm	1,62	54	28	1,92

onde U é o coeficiente global de transmissão térmica e *PVB* é uma película de polivinil butiral, segundo catálogo do fabricante (Guardian, 2011).

Em seguida, foram feitas simulações da edificação com cada tipo de vidro, acopladas com o sistema VRF e o controle de iluminação natural. Denominou-se os prédios com as modificações de Prédio 1, Prédio 2, Prédio 3, Prédio 4 e Prédio 5, conforme os vidros da Tabela 6.3. Os resultados dessas simulações podem ser vistos na Tabela 6.4 e abrangem o consumo total durante todo o ano.

Tabela 6.4 – Consumo anual dos prédios.

	Consumo (kW.h/ano)	Redução em relação ao Prédio Base (%)
Prédio 1	336.870	34,92
Prédio 2	338.263	34,65
Prédio 3	325.955	37,02
Prédio 4	322.006	37,79
Prédio 5	320.841	38,01

Após a análise das simulações, escolhe-se a configuração do Prédio 3 como sendo a solução que mantém as características da edificação, por ser o vidro que mais se assemelha ao vidro original, ao mesmo tempo que possui uma significativa redução de consumo anual. Para uma melhor compreensão do estudo, o Prédio 3 será nomeado Prédio Modificado.

6.3. COMPARAÇÃO ENTRE PRÉDIO BASE E PRÉDIO MODIFICADO

A evolução do consumo mensal de energia elétrica, em kW.h, obtida entre o Prédio Base e o Prédio Modificado é mostrada através do gráfico da Figura 6.1. A linha que representa o consumo do sistema de climatização (HVAC) abrange a soma dos gastos de refrigeração, aquecimento, ventiladores e bombas. Já a soma dos consumos da iluminação interna e equipamentos, geram a linha Prédio. O consumo energético total da edificação é

representado pela soma da iluminação externa com o ar condicionado e o prédio, tendo o valor de 325.955 kW.h/ano, para o Prédio Base.

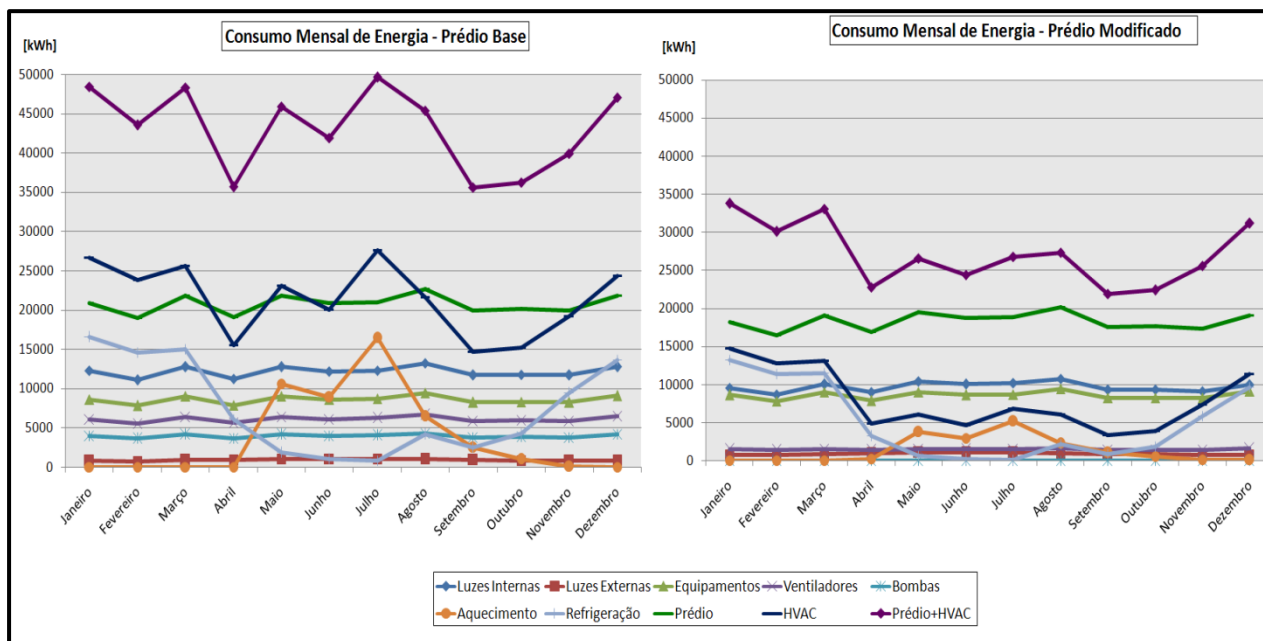


Figura 6.1 – Consumo mensal de energia para os prédios Base e Modificado.

Analisando o progresso do consumo de energia ilustrado na Figura 6.1, percebe-se uma variação considerável no gasto de energia total do prédio, representada no gráfico pela linha Prédio + HVAC. A redução no consumo de energia total do Prédio Base para o Prédio Modificado foi de 37,02%, já a redução de energia gasta pelo HVAC foi de 62,98%. Isto se deve ao fato do sistema VRF não utilizar bombas, ao contrário do sistema de água gelada e, além disso, ao menor consumo dos ventiladores, do ciclo de refrigeração e de aquecimento, que no sistema de água gelada é feito por uma resistência elétrica. A redução da iluminação interna com o controle de iluminação natural foi de 20,20%. O gráfico da Figura 6.2 ilustra essa análise representando o consumo anual de cada componente para ambos os prédios.

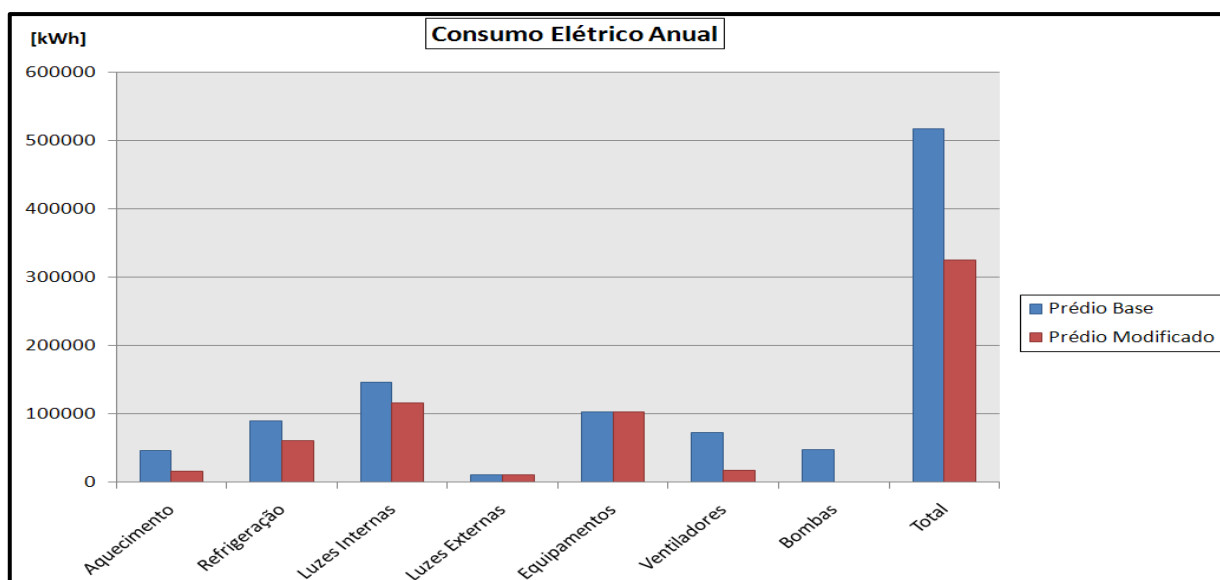


Figura 6.2 – Participação dos componentes no consumo elétrico anual para ambos os prédios.

O custo da energia elétrica, em R\$, consumida para as duas situações, foi obtido utilizando-se a tarifa de R\$ 0,315930 / kW.h, utilizada para edificações de classe comercial, conforme CEEE, 2011. Na Figura 6.3, compara-se o custo da energia mensal para as duas configurações do prédio.

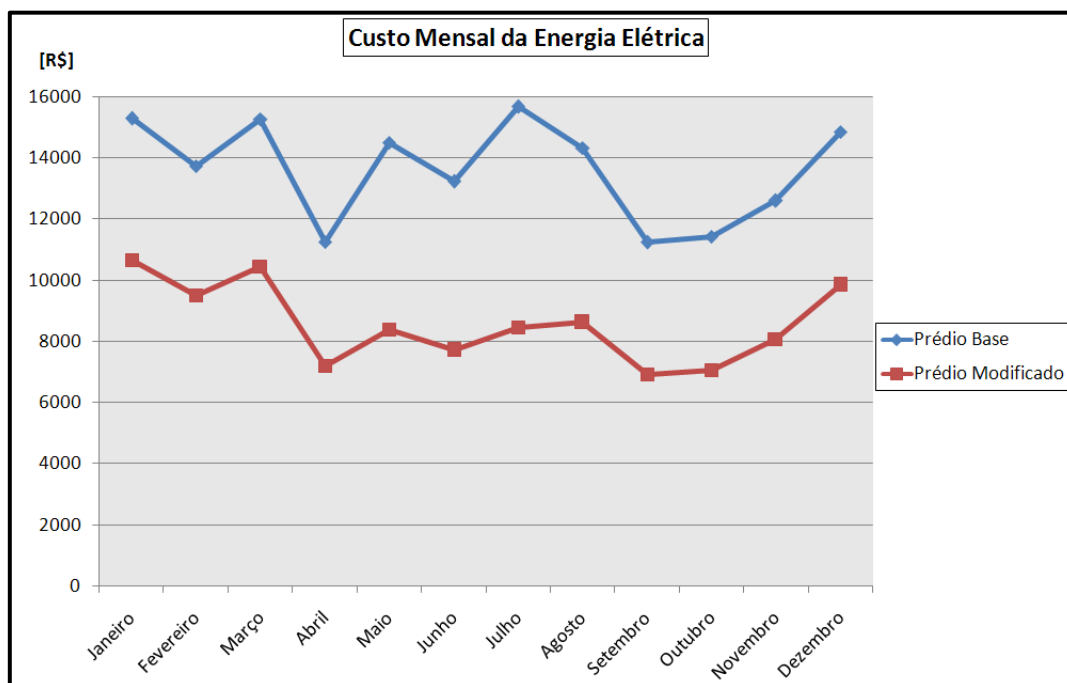


Figura 6.3 – Custo mensal de energia elétrica para os dois prédios simulados.

É possível notar na análise do gráfico da Figura 6.3, que o Prédio Base possui um gasto mensal com energia elétrica mais elevado que o Prédio Modificado. Isso se deve ao fato de o Prédio Base possuir um grande gasto com bombas, ventiladores e aquecimento do sistema de climatização existente nele e possuir uma envoltória com vidros não eficientes, no ponto de vista termo-energético.

7. CONCLUSÕES

Verifica-se a possibilidade de melhorar a eficiência térmica e energética de uma edificação através de alterações arquitetônicas e de climatização. É possível obter uma redução significativa no consumo de energia elétrica da edificação através da aplicação de vidros de alto desempenho termo-energético, assim como um controle de aproveitamento da luz natural. Constata-se ainda que a alteração do sistema de climatização para um sistema mais eficiente acarreta em uma grande redução no consumo de energia.

Alcançou-se neste trabalho resultados que estão coerentes com resultados obtidos nos trabalhos de Carvalho, 2009, Boeno, 2010, Carotenuto, 2009 e Pereira, 2005. As simulações realizadas no *EnergyPlus*, utilizando as correlações de desempenho, ajustadas com dados fornecidos pelo fabricante, permitiram o dimensionamento de um novo sistema de climatização, o mais próximo da realidade, proposto para a edificação existente.

Neste sentido, a utilização de ferramentas computacionais de simulação energética em edificações, como o *EnergyPlus*, se mostra um grande aliado na tomada de decisões, uma vez que pode ser previsto o comportamento termo-energético a partir da influência de diversos fatores. A partir desta previsão, pode-se propor alterações no projeto visando uma redução de energia.

Portanto, conclui-se que é possível conseguir uma redução significativa de energia em edificações, aplicando alterações de arquitetura e climatização, acarretando em um menor impacto ambiental.

O presente trabalho não realizou uma análise de viabilidade econômica nas modificações propostas e nem uma análise de retorno de investimento. Assim, fica como sugestão para trabalhos futuros a análise econômica de cada modificação proposta e a análise de retorno de investimento, para verificar se mesmo com um menor gasto com energia elétrica, é viável a instalação das alterações propostas.

REFERÊNCIAS

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

ASHRAE; “**ASHRAE Fundamentals HandBook**”, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., SI Edition, Atlanta, USA, 2005.

ASHRAE; “**Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings**”. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., SI Edition, Atlanta, USA, 2007.

Boeno, W. S.; “**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.

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.

Carvalho, R. O.; “**Avaliação do Custo Energético Anual de uma Edificação Comercial Utilizando um Software de Simulação**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CEEE; “**Tabela de tarifas convencional**”, http://www.ceee.com.br/pportal/archives/Tabela_Convencional_2010.pdf. Acessado em 31/05/2011.

Daikin; “**Engeneering Data VRV III, Heat Pump**”, ED 34 – 845A, Daikin Industries, Japan, 2006.

EnergyPlus; “**EnergyPlus Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**”, Version 6.0., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2011.

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

Guardian; “**Manual Técnico – Build with Light**”, http://www.sa.pt.sunguardglass.com/stellentdev/groups/sunguardsouthamerica/documents/web_assets/gi_002781.pdf. Acessado em 01/06/2011.

LABEE; **“Arquivos Climáticos”**, <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acessado em 20/04/2011.

Ministério de Minas e Energia; **“Plano Decenal de Expansão de Energia 2008 - 2017”**, http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pde_2008_2017/PDE2008-2017_VOL1_CompletoM.pdf. Acessado em 25/04/2011.

Neto, A. H.; **“Redução no Consumo de Energia em Edifícios Existentes”**, <http://engenhariaearquitectura.com.br/wp/?p=8137>. Acessado em 28/04/2011.

Pereira, F. L.; **“Determinação Computacional da Influência de Parâmetros Físicos no Comportamento Termoenergético de uma Edificação”**, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ANEXO A – PROJETO DE ARQUITETURA DE INTERIORES - PLANTAS BAIXAS

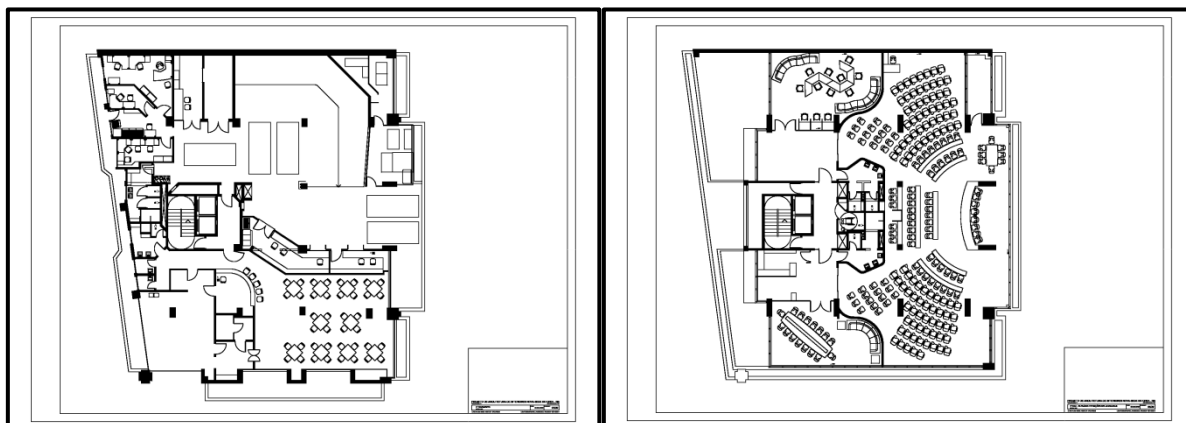


Figura A.1 – Plantas baixas do segundo e terceiro pavimentos.

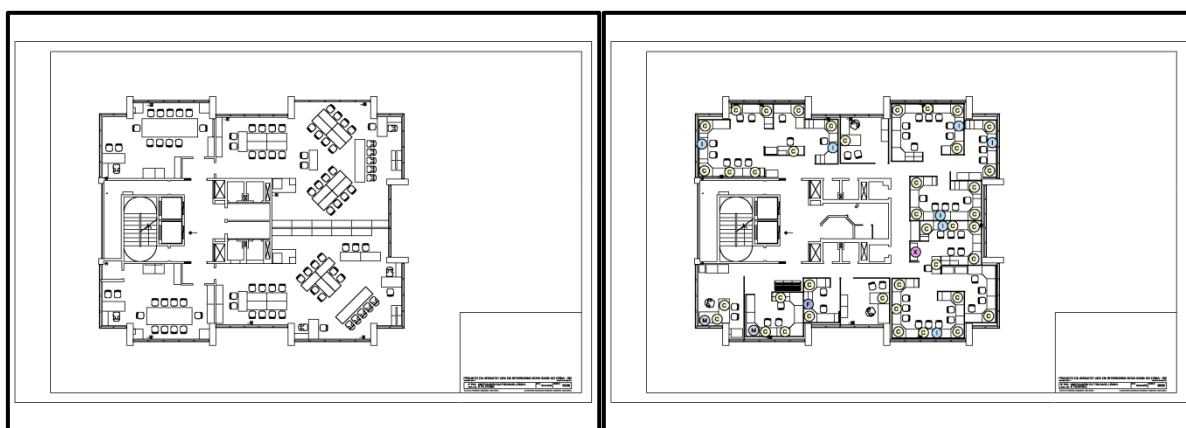


Figura A.2 – Plantas Baixas do quarto pavimento e pavimento tipo.

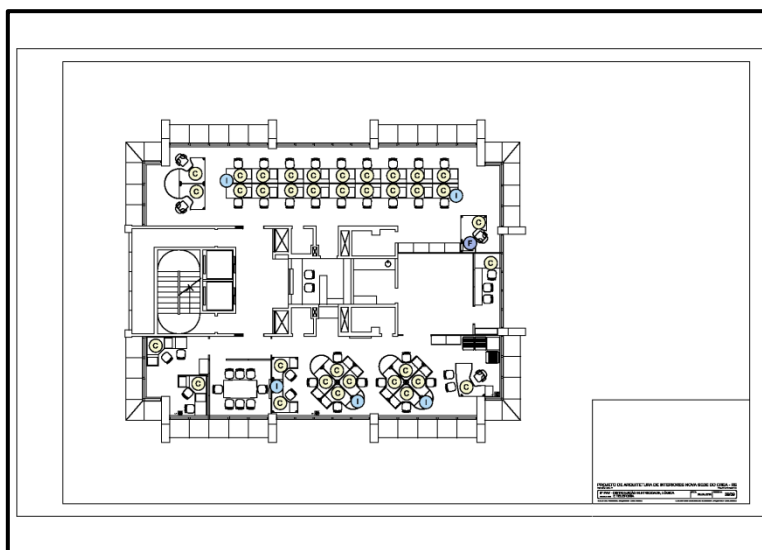


Figura A.3 – Planta Baixa do nono pavimento.

ANEXO B – ROTINA DE SIMULAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DAS UNIDADES
CONDICIONADORAS DA EDIFICAÇÃO

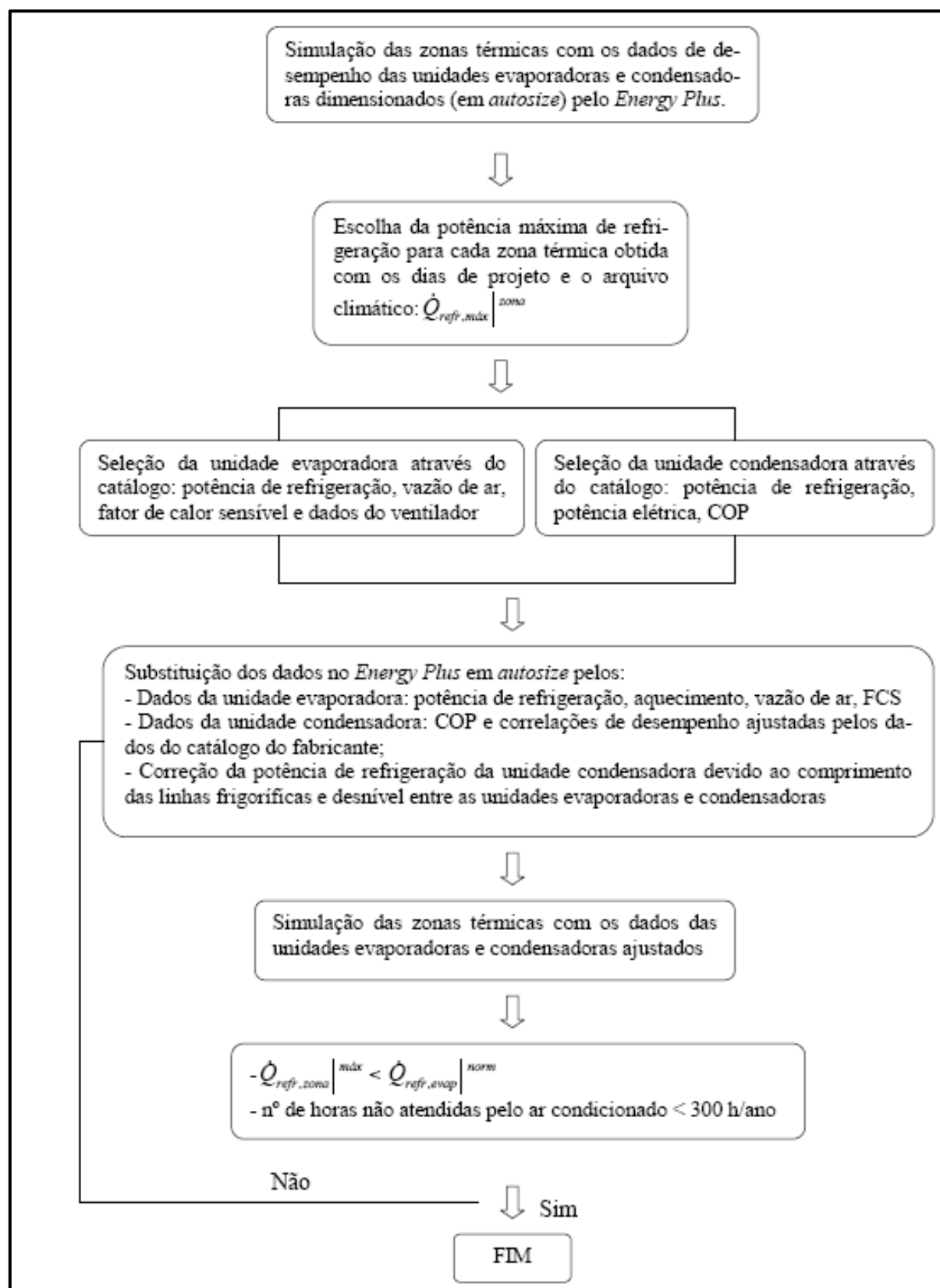


Figura B.1 – Fluxograma para seleção das unidades condicionadoras.

APÊNDICE A – DIVISÃO DAS ZONAS PARA SIMULAÇÃO

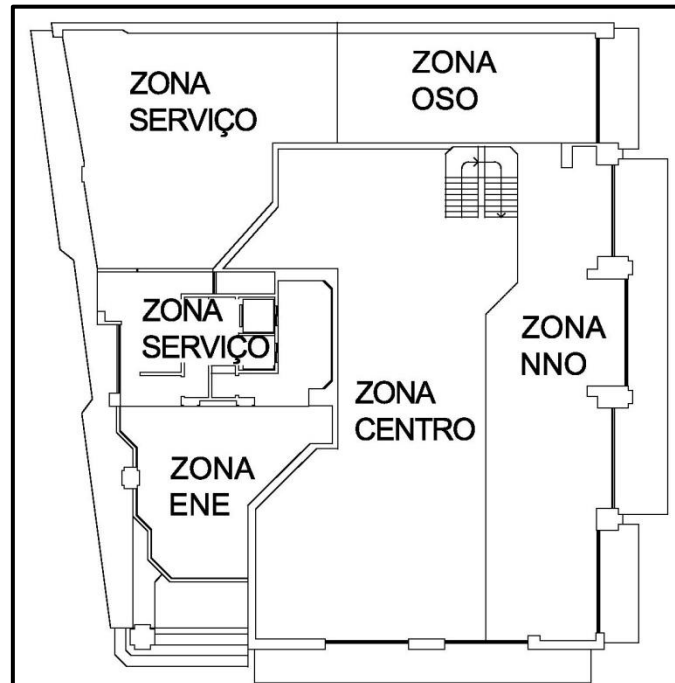


Figura A.1 – Divisão das zonas para o térreo.

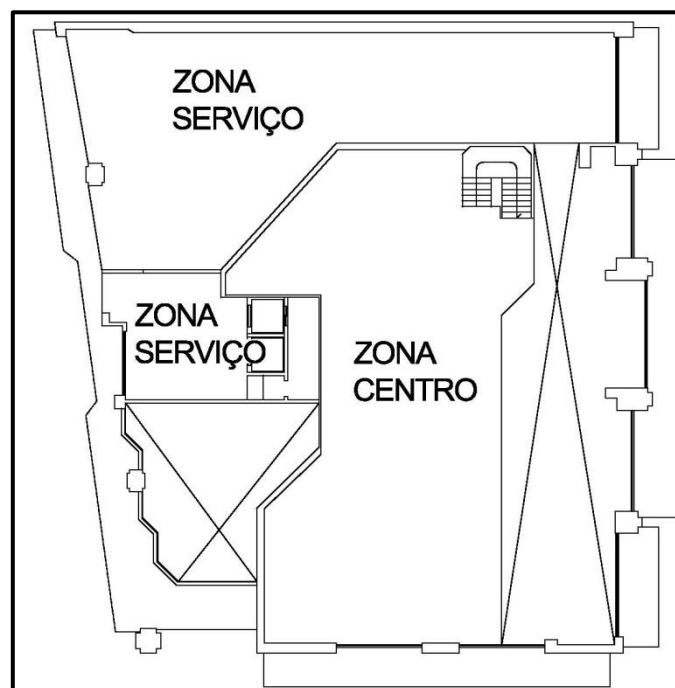


Figura A.2 – Divisão das zonas para o mezanino.

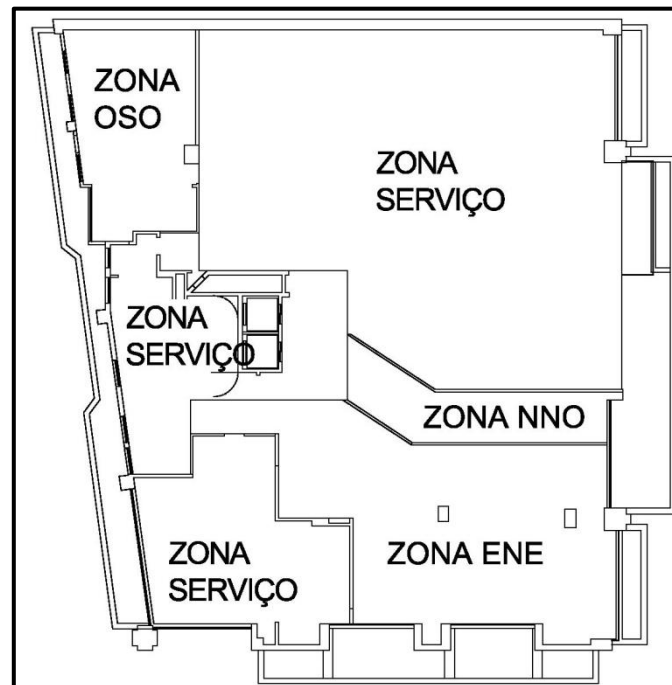


Figura A.3 – Divisão das zonas para o segundo pavimento.

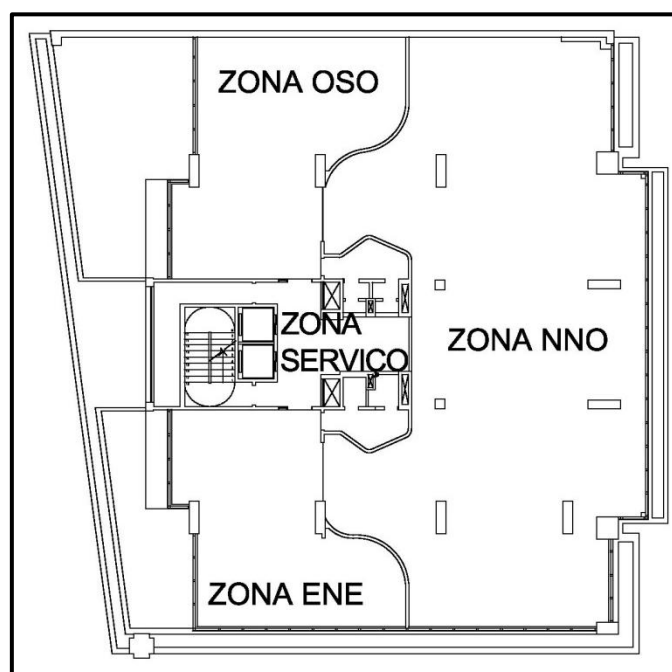


Figura A.4 – Divisão das zonas para o terceiro pavimento.

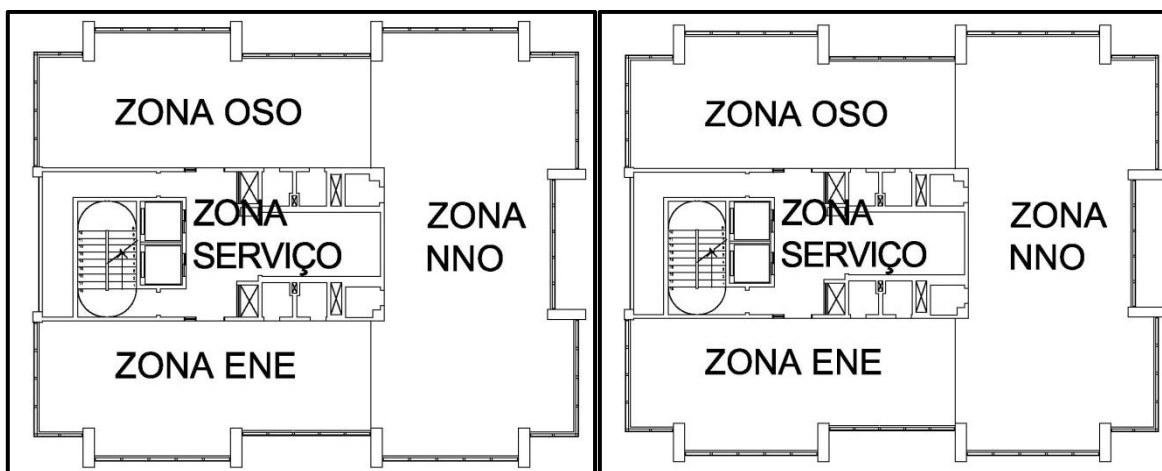


Figura A.5 – Divisão das zonas para o quarto pavimento e o pavimento tipo.

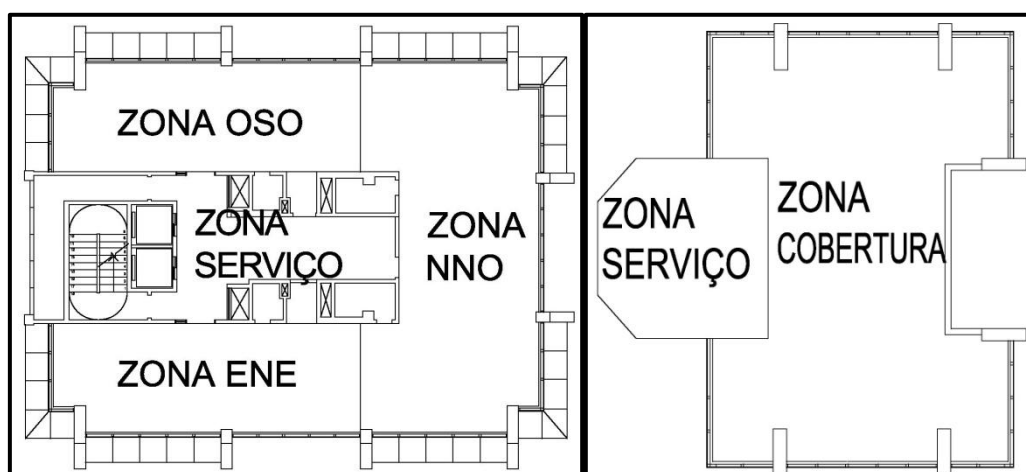


Figura A.6 – Divisão das zonas para o nono pavimento e a cobertura.