

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

ANÁLISE DA CERTIFICAÇÃO LEED ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

por

Gabriela Seibert

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 Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, dezembro de 2017



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

ANÁLISE DA CERTIFICAÇÃO LEED ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA

por

Gabriela Seibert

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

Prof. Dr.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transportes.**

Orientador: Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin.

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Ana Paula Ost

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 05 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha madrinha Noeli que me incentivou a começar e a não desistir dessa caminhada.

Ao meu namorado Tiago, por toda a ajuda, carinho, dedicação e compreensão sempre.

Aos meus pais, por todo amor e cuidados.

Aos amigos e familiares que apoiaram e entenderam todas as ausências nesses anos todos.

E ao meu professor orientador Cirilo por toda ajuda.

SEIBERT, G. **Análise da Certificação LEED através de Simulação Termoenergética**. 2017. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Pensando na necessidade cada vez maior de economia de energia, busca-se com este trabalho analisar a aplicação da certificação LEED nas edificações e mensurar o quão econômicas essas construções podem ser. Para tanto, realizou-se uma simulação termoenergética, através do *software EnergyPlus*, onde foi especificado toda a parte construtiva, ocupacional e operacional da edificação. Primeiramente, foi verificado o enquadramento do prédio existente nos critérios energéticos da certificação LEED e se o nível de eficiência podia ser melhorado. Isso foi feito comparando a edificação existente com o prédio base que atende as recomendações da ASHRAE Standard 90.1, 2010. Desta forma, foram propostas melhorias na edificação existente, tais como a utilização de vidros termoenergicamente mais eficientes, substituição do sistema de ar condicionado e a utilização da iluminação natural. Concluiu-se que é possível reduzir o consumo de energia total do prédio de forma significativa, com o valor percentual de 17,3%. Por fim, a certificação busca incentivar a construção de edificações com menor impacto ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: LEED, *EnergyPlus*, eficiência termoenergética, certificação.

SEIBERT, G. **Analysis of LEED Certification through Thermoenergetic Simulation**. 2017. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Considering the increasing need to save energy, this work seeks to analyze the application of LEED certification in buildings and measure how economic these constructions can be. Therefore, thermo energy simulation through the *EnergyPlus* software was made, where all the constructive, occupational and operational part of the building was specified. First, the existing building framework was verified in the LEED energy criteria and whether the level of efficiency could be improved. This was made by comparing an existing building with the base building that meets the ASHRAE Standard 90., 2010 recommendations. Finally, improvements have been proposed in the existing building, such as the use of more efficient thermo-energetically glass, replacement of the air conditioning system and the use of natural lighting. It was concluded that it is possible to reduce the building's total energy consumption significantly, with the percentage value of 17.3%. Therefore, it shows that the certification encourages the construction of buildings with less environmental impact.

KEYWORDS: LEED, *EnergyPlus*, energy efficiency, certification.

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. CERTIFICAÇÃO LEED.....	2
5. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
5.1. NORMA DE ENERGIA PARA CONSTRUÇÕES.....	2
5.2. <i>GOOGLE SKETCHUP</i>	3
5.3. <i>OPEN STUDIO</i>	3
5.4. <i>ENERGYPLUS</i>	3
5.4.1. DIAS DE PROJETO.....	3
5.4.2. ARQUIVO CLIMÁTICO.....	3
5.4.3. UTILIZAÇÃO E OCUPAÇÃO HORÁRIA.....	4
5.4.4. DADOS DE SAÍDA.....	4
6. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA.....	4
7. METODOLOGIA E SIMULAÇÃO.....	6
7.1. EDIFICAÇÃO.....	6
7.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO PRÉDIO BASE.....	7
7.3. CARGAS INTERNAS DO PRÉDIO BASE.....	8
7.3.1. ILUMINAÇÃO.....	8
7.3.2. PESSOAS E EQUIPAMENTOS.....	8
7.3.3. INFILTRAÇÃO.....	8
7.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR DO PRÉDIO BASE.....	8
7.5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO PRÉDIO EXISTENTE.....	8
7.6. CARGAS INTERNAS DO PRÉDIO EXISTENTE.....	9
7.6.1. ILUMINAÇÃO.....	9
7.6.2. PESSOAS E EQUIPAMENTOS.....	9
7.6.3. INFILTRAÇÃO.....	9
7.7. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR DO PRÉDIO EXISTENTE.....	9
7.8. RESULTADOS PRELIMINARES.....	9
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
8.1. CONSUMO DO PRÉDIO EXISTENTE.....	10
8.2. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS.....	10
8.2.1. ALTERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CLIMATIZAÇÃO.....	10
8.2.2. ALTERAÇÃO DOS VIDROS.....	10
8.2.3. UTILIZAÇÃO DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	11
8.2.4. ALTERAÇÃO DAS SUPERFÍCIES OPACAS.....	11
8.2.5. PRÉDIO PROPOSTO.....	11
8.3. COMPARAÇÃO ENTRE O PRÉDIO EXISTENTE E O PRÉDIO PROPOSTO.....	12
9. CONCLUSÕES.....	14

1. INTRODUÇÃO

Como alguns recursos naturais vêm se esgotando a cada dia, é cada vez mais relevante buscar poupá-los. Uma forma de promover economia de energia é aplicar soluções de engenharia, procurando melhorar as construções futuras.

Em 2015, o Ministério de Minas e Energia publicou uma cartilha para promover e guiar a redução do consumo energético nas edificações públicas no Brasil. Segundo o guia, o consumo das edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas são responsáveis por 50% do consumo de energia no país.

O desempenho energético de uma edificação está relacionado a fatores que se inter-relacionam, os quais dependem desde as estratégias de gerenciamento e controles utilizados pela administração, até as características físicas dos materiais que compõem o envoltório da construção.

Levando em conta a importância de uma edificação ser pensada para economizar energia, este trabalho consiste na realização da simulação termoenergética de um prédio e análise do quesito de economia de energia da certificação *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED).

2. OBJETIVOS

Considerando a necessidade de promover a economia de energia nas edificações, se tem como objetivo verificar se esta é possível realizando alterações arquitetônicas e do sistema de climatização.

Sendo assim este trabalho visa alcançar os seguintes objetivos:

- Realizar a construção de maquete eletrônica de um prédio base que atende os requisitos da norma de eficiência energética ASHRAE Standard 90.1, 2010 e simular termoenergicamente essa edificação para obter o consumo do mesmo.
- Realizar a construção do prédio existente, também em maquete eletrônica, simular termoenergicamente, obter o consumo da edificação, comparar os resultados com aqueles obtidos no prédio base e verificar se o mesmo atende algum nível de economia de energia para certificação LEED.
- Propor melhorias para aumentar o nível de eficiência energética do prédio existente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A certificação LEED pode ser considerada como uma boa ferramenta para atestar a eficiência energética de uma edificação. O estudo de Beltram, 2015 concluiu que essas medidas de eficiência energética aplicadas às edificações comerciais são capazes de reduzir significativamente o consumo de energia elétrica. O autor conclui que é possível uma redução de 18% no consumo de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos.

Knijinik, 2011 já havia realizado um estudo a respeito da certificação LEED em edificações comerciais. Sua conclusão foi de que a utilização de parâmetros construtivos e equipamentos energeticamente eficientes permitem a construção de empreendimentos que não agredem o meio ambiente. Entre os resultados do seu trabalho, o de melhor cenário foi a substituição do sistema de ar condicionado, utilização de sombreamento externo, vidros de alta performance e utilização de sistemas de controle de iluminação. O autor concluiu também, que para não haver custos adicionais, tendo em vista a certificação, as soluções devem ser pensadas desde a concepção do projeto.

Para a obtenção do selo LEED, dá-se uma pontuação para diversos quesitos construtivos e entre eles o que é responsável pela mais alta pontuação, segundo Souza, 2009, é a utilização de sistemas que visam à eficiência energética do edifício. Seu estudo aponta que um bom planejamento

da orientação geográfica do prédio e as soluções arquitetônicas empregadas permitem reduzir os gastos com energia.

4. CERTIFICAÇÃO LEED

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) é um dos principais selos de certificação para edificações e foi criado em 1999 para incentivar a produção de “projetos verdes” voltados para a sustentabilidade. A obtenção do selo de uma edificação mostra que a mesma é mais econômica e correta ambientalmente. A certificação LEED pode ser obtida através da avaliação dos seguintes itens:

- *Minimum Program Requirements* – requisitos quanto ao atendimento das normas vigentes;
- *Sustainable sites* – trata da preocupação quanto à localização e a facilidade de mobilidade urbana a qual esta está inserida;
- *Water efficiency* – avalia e valoriza o uso eficiente e racional da água;
- *Energy & atmosphere* – premia a eficiência energética da edificação;
- *Materials & resources* – incentiva a utilização de materiais de baixo impacto ambiental;
- *Indoor environmental quality* – critérios que prezam pela qualidade do ambiente interno;
- *Innovation in design or innovation in operations* – créditos extras para inovações com performance excepcional.

A avaliação dos itens citados é realizada na fase de projeto, tanto para uma construção nova, quanto para reformas e, conforme os mesmos são contemplados, é dada uma pontuação. O nível da certificação é definido conforme a quantidade de pontos adquiridos, podendo variar de 40 a 110 pontos. Os níveis são: Certificado, Silver, Gold e Platinum.

Este trabalho visa estudar o item *Energy & Atmosphere*, sendo o item com a maior quantidade de pontos e onde se aplica a simulação termoenergética da edificação. A melhor opção para pontuar nesta seção é demonstrar uma melhoria percentual comparando-se à edificação proposta com a edificação base, onde este deverá seguir as recomendações do apêndice G da norma ASHRAE Standard 90.1, 2010 apresentada no item 5.1 deste trabalho.

5. FUNDAMENTAÇÃO

A seguir, são apresentados os programas, recursos e conceitos utilizados para a realização do trabalho.

5.1. NORMA DE ENERGIA PARA CONSTRUÇÕES

Devido à crise do petróleo na década de 70, algumas atitudes foram tomadas visando a redução de economia de energia no mundo inteiro. Entre elas, está a criação da primeira norma de eficiência energética, a ASHRAE Standard 90 no ano de 1975. Em 1989, ela foi atualizada e se tornou Standard 90.1.

A norma ASHRAE Standard 90.1, 2010 contempla o envoltório da edificação, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, o aquecimento de água de serviço, a energia elétrica, a iluminação e quaisquer outros equipamentos, bem como apresenta métodos de análise de eficiência energética.

O método da norma utilizado neste trabalho encontra-se no apêndice G e diz que a edificação deve atender os requisitos obrigatórios definidos nas seções 5.4, 6.4, 7.4, 8.4, 9.4 e 10.4 desta mesma norma.

5.2. GOOGLE SKETCHUP

O *Google Sketchup* é o programa utilizado para modelagem tridimensional das edificações base e existente. Foi desenvolvido pela *At Last Software* e a versão utilizada foi a 8.0.1.

5.3. OPEN STUDIO

O *Open Studio* é um *plugin* instalado no *Google Sketchup* para criação de zonas térmicas, bem como definições e configurações utilizadas posteriormente no *EnergyPlus*. Desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis, a versão utilizada foi 1.0.1.1.

5.4. ENERGYPLUS

EnergyPlus é um programa que permite realizar a simulação da carga térmica e a análise energética de edificações e seus sistemas. Ele analisa parâmetros que influenciam na dinâmica térmica das edificações, como as características físico construtivas, posicionamento geográfico, condições climáticas e fluxos através das superfícies envoltórias. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, a versão utilizada foi 8.1. Este programa possui raízes em dois outros programas: *Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST)* e *Department of Energy (DOE)*. Ambos iniciaram seu desenvolvimento na década de 70 como ferramentas de simulação de carga térmica e de análise de consumo de energia elétrica. Estes dois programas foram desenvolvidos devido às preocupações pela crise mundial de energia na década de 70 e ganhou força mais tarde quando se teve o reconhecimento de que o consumo de energia elétrica em edificações é o principal componente do consumo total de energia elétrica dos Estados Unidos. [Strand, R., et al. 1999]. O programa trabalha com o conceito de zona térmica, que é um ambiente que troca calor com ambientes adjacentes e o exterior, além de possuir temperatura do ar interior uniforme.

5.4.1. DIAS DE PROJETO

Dias de projeto são dados utilizados como referência para dimensionamento de sistemas de climatização e carga térmica. Estão definidos pela ASHRAE, 2010 e incluem valores de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido, ponto de orvalho, velocidade do vento, dentre 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 8.760 horas do ano. Ou seja, 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 à 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 8.760 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. Os conceitos são entendidos a partir de Beyer, 2016. Nas simulações realizadas neste trabalho foram utilizados os dias de projeto referentes ao percentual de 0,4% e adotou-se a temperatura de controle do termostato para o verão de 24°C e para o inverno de 22°C.

5.4.2. ARQUIVO CLIMÁTICO

O arquivo climático é montagem estatística de uma medição horária anual de diversos dados meteorológicos. Os dados são coletados por um período igual ou superior a dez anos para a localidade desejada. Entre as informações coletadas, pode-se citar: temperatura de bulbo seco,

temperatura de bulbo úmido, temperatura de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, índice de nebulosidade do céu e radiação solar.

Neste trabalho, o arquivo climático de Porto Alegre foi obtido através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2017) no formato EPW (*EnergyPlus Weather*), que é próprio para a utilização no *EnergyPlus*.

5.4.3. UTILIZAÇÃO E OCUPAÇÃO HORÁRIA

Para realizar a simulação, o programa deve ser informado sobre o cronograma de ocupação e utilização da edificação. Nesse perfil, configuram-se os períodos de ocupação do prédio por pessoas, a utilização de equipamentos, uso da iluminação e a utilização dos sistemas de ar condicionado.

Para este trabalho, utiliza-se um cronograma para todos os dias do ano, durante 24 horas por dia, com exceção de finais de semana e feriados em que o prédio está desocupado, por se tratar de um empreendimento comercial.

A ocupação e utilização de iluminação, equipamentos e sistema de climatização segue o perfil apresentado na figura 5.1 abaixo:

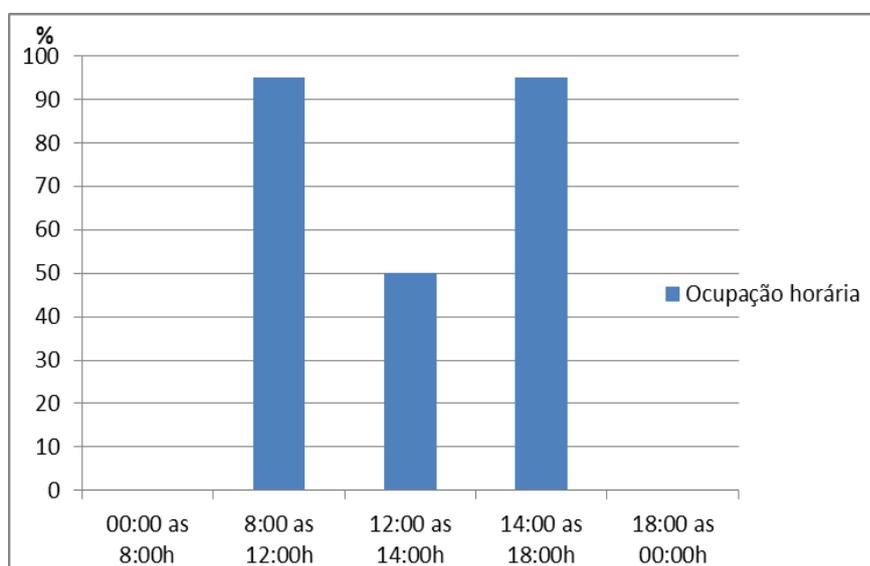


Figura 5.1 – Ocupação horária diária de uma edificação comercial.

5.4.4. DADOS DE SAÍDA

O programa *EnergyPlus* é capaz de gerar diferentes dados de saída, sendo estes definidos pelo usuário, conforme a necessidade. É capaz de gerar relatórios de consumo e relatórios de carga térmica, potência dos equipamentos e relatórios de consumo de energia mensal ou diário.

6. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA

O equacionamento básico para a resolução do balanço de energia nas superfícies opacas externas do *EnergyPlus* apresenta a seguinte forma:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (6.1)$$

Como se pode ver na figura 6.1.

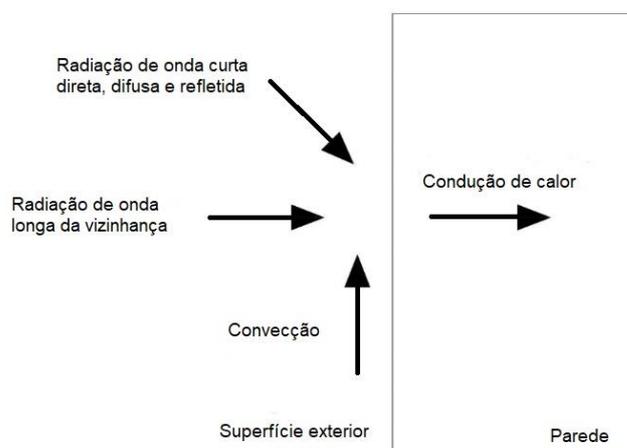


Figura 6.1 – Diagrama do Volume de controle de balanço de energia para superfícies externas (EnergyPlus Engineering Document, 2017)

onde q''_{asol} refere-se ao fluxo de calor absorvido de radiação solar direta, difusa e refletida (comprimento de onda curto) [W/m²], q''_{LWR} refere-se à radiação térmica de onda longa da vizinhança [W/m²], q''_{conv} é o fluxo referente à convecção [W/m²] e q''_{ko} o fluxo referente à condução de calor [W/m²].

Já a taxa de transferência de calor das janelas se dá por:

$$Q = UA_{pf}(t_{out} - t_{in}) + (SHGC)A_{pf}E_t + (AL)A_{pf}\rho C_p(t_{out} - t_{in}) \quad (6.2)$$

onde Q é a taxa de transferência de calor [W], U é o coeficiente global de transferência de calor [W/(m².K)], A_{pf} é a área total de janelas [m²], t_{in} é a temperatura interna do ambiente [°C], t_{out} é a temperatura externa [°C], $SHGC$ é coeficiente de ganho de calor solar adimensional, E_t é a radiação total incidente [W/m²], ρ é a densidade do ar [kg/m³], AL é o vazamento de ar [m³/s.m²] e C_p é o calor específico do ar [J/kg.K];

O coeficiente de ganho de calor solar pode ser calculado da seguinte forma:

$$SHGC(\theta, \lambda) = T(\theta, \lambda) + NA(\theta, \lambda) \quad (6.3)$$

onde T é a transmitância espectral do vidro [W/m².K], A é a absorptância espectral do vidro, N a fração da radiação absorvida dissipada para o ambiente interno, θ o ângulo de incidência [°] e λ o comprimento de onda [mm].

Posteriormente, o equacionamento para a resolução do balanço de calor sensível nas zonas térmicas do *EnergyPlus* apresenta a seguinte forma:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m} C_p (T_{si} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sist} C_p (T_{si} - T_z) \quad (6.4)$$

onde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada na zona térmica em (W), $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$ 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), $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m} C_p (T_{si} - T_z)$ é o somatório das taxas de calor provenientes do ar de outras zonas em (W), $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a taxa de calor proveniente da infiltração de ar externo

na zona em (W), $\dot{m}_{sist} c_p (T_{zi} - T_z)$ é a taxa de calor fornecida pelo sistema de ar condicionado a zona em (W).

A temperatura dentro da zona se apresenta da seguinte forma:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sist} C_p T_{insuflamento}^t + (C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{Nsuperficies} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m} C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty})^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + (\sum_{i=1}^{Nsuperficies} h_i A_i + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sist} C_p)} \quad (6.5)$$

onde δt é o intervalo no tempo t, T_{zi} é a temperatura média do ar na zona adjacente [°C], T_{∞} é a temperatura ambiente do ar exterior [°C], C_z é a capacitância térmica do ar da zona [J/K].

Para realizar a correção do calor latente nas zonas térmicas, o *EnergyPlus* utiliza equação de terceiro grau apresentada a seguir:

$$W_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{Nsl} kg_{massa,i} + \sum_{i=1}^{Nsuperficies} A_i h_{mi} \rho_{arc} W_{superfisi} + \sum_{i=1}^{Nzonas} m_i W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_{\infty} + m_{sist} W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_{sup} + \frac{\rho_{ar} V_z C_w}{\delta t} (3W_z^{t-\delta t} - \frac{3}{2}W_z^{t-2\delta t} + \frac{1}{3}W_z^{t-3\delta t})}{\frac{\rho_{ar} V_z C_w}{\delta t} (\frac{11}{6}) + \sum_{i=1}^{Nsuperficies} A_i h_{mi} \rho_{arc} + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + m_{sist}} \quad (6.6)$$

onde W é a quantidade de umidade [kg_w/ kg_{as}].

Os fluxos de calor das superfícies opacas nas zonas são resolvidos com funções de transferência, matricialmente, e partem da seguinte equação:

$$q_{ko}''(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{0,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (6.7)$$

onde q'' é fluxo de calor [W/m²], T é temperatura [°C], i representa o interior da zona, o representa o exterior, t representa o passo de tempo atual e X e Y são o fatores de resposta.

7. METODOLOGIA E SIMULAÇÃO

A metodologia empregada neste trabalho consiste nas seguintes etapas:

- 1º etapa: Confecção da maquete eletrônica no *Google Sketchup* com *plugin Open Studio*, definição de elementos construtivos, posição geográfica e zonas térmicas dos prédios base e existente.
- 2º etapa: Importar maquetes eletrônicas para o *EnergyPlus*, levantamento e inserção de dados.
- 3º etapa: Uma vez que a alimentação de dados para o Software esteja pronta, a simulação poderá ser realizada e os resultados deverão ser comparados. O prédio base, deverá ser simulado com os parâmetros previstos pela norma.
- 4º etapa: Aplicação de solução arquitetônica e de engenharia para o prédio proposto.
- 5º etapa: Simulação do prédio com as alterações propostas, com resultados das cargas térmicas e consumo elétrico dos sistemas de ventilação, iluminação e equipamentos de ar condicionado.
- 6º etapa: Análise dos resultados.

7.1. EDIFICAÇÃO

Neste item, informam-se todos os parâmetros de análise para a edificação simulada.

A simulação é realizada nas 8.760 horas do ano e se baseia nas informações de temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação solar do arquivo climático da cidade de Porto Alegre / RS. Ela possui oito pavimentos, sendo um pavimento térreo, seis pavimentos típicos e um

pavimento de cobertura. O envoltório do prédio existente é constituída em sua maior parte por vidros. As plantas baixas podem ser vistas no apêndice A deste trabalho.

O modelo realizado no *Google Sketchup* pode ser visualizado na figura abaixo:

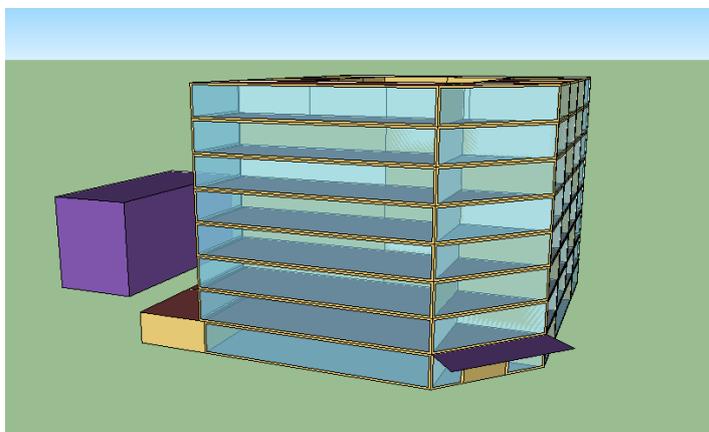


Figura 7.1 – Modelo tridimensional da edificação proposta

Para realizar a simulação, a edificação foi dividida em 83 zonas térmicas. Essas zonas térmicas, segundo a NBR 16.401, 2008 são definidas pelo regime de utilização e perfil de carga térmica e podem ser vistas no apêndice B deste trabalho. As zonas térmicas permitem que as condições requeridas possam ser mantidas com um único dispositivo de controle ou atendidas por apenas um equipamento condicionador destinado àquela zona. Destas 83 zonas térmicas, dezoito foram consideradas como não climatizadas, por se tratarem de zonas de circulação, elevadores e de pouca ocupação.

7.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO PRÉDIO BASE

A edificação estudada pertence a cidade localizada na zona climática da norma ASHRAE Standard 90.1, 2010, 2A. Zonas climáticas são divisões de regiões em determinado território que se assemelham nas características climáticas. Porto Alegre é caracterizada como quente e úmida. Para atender as seções da norma solicitadas no apêndice G de norma, o prédio base deverá contemplar as características descritas a seguir. O prédio base é virtual e é simulado apenas para fins comparativos.

Os elementos de construção, como paredes externas e internas, pisos externos e internos, forros, coberturas e janelas que estão em conformidade com a norma, são mostrados na Tabela 7.1, bem como suas principais propriedades termofísicas. A norma define três parâmetros para caracterizar a edificação. Os fatores são o U (coeficiente global de transferência de calor $[W/m^2.K]$), o R (resistência térmica $[m^2.K/W]$) e o SHGC (coeficiente de ganho de calor solar). O adimensional SHGC é a razão entre a energia que entra pela janela e a radiação solar incidente.

Tabela 7.1 – Características construtivas do prédio base – zona 2A

Superfície	Resistência Térmica $[m^2.K/W]$	Coefficiente global de transferência de Calor $[W/m^2.K]$
Telhado	3,5	0,275
Paredes internas	2,3	0,70
Paredes externas	2,3	0,70
Piso interno	1,1	0,60
Piso externo	-	1,26

Para as janelas, deve ser usado um SHGC igual a 0,25, transmitância térmica de 4,26 [W/m².K] e uma transmitância visível de 0,18 [W/m².K]. Estas devem ter no máximo 40% da superfície de uma parede.

7.3. CARGAS INTERNAS DO PRÉDIO BASE

Cargas internas de uma edificação são fontes internas geradoras de calor e umidade. Referem-se às pessoas, iluminação, equipamentos e infiltração.

7.3.1. ILUMINAÇÃO

A norma exige para esse tipo de ocupação, que no caso é comercial, uma densidade de potência de iluminação de 11 W/m². Já para a área externa a iluminação é de 98 W por porta de entrada.

7.3.2. PESSOAS E EQUIPAMENTOS

O número de pessoas foi definido por uma recomendação da norma NBR 16.401, 2008 e é de 5 m²/pessoa. Como a carga de equipamentos para esse tipo de edificação está relacionada ao uso de computadores, ela será ser igual à carga definida no prédio existente, como especificado no item 7.6.2 deste trabalho.

7.3.3. INFILTRAÇÃO

Infiltração em um ambiente pode ser determinado como o percentual do volume total de ar do mesmo que é trocado no período de uma hora. Foi considerado para todas as zonas climatizadas 0,5 trocas por hora. Para as zonas de serviço, ou seja, não climatizadas, considerou-se o valor de 1 troca por hora. Ambas as aplicações seguem as recomendações da ASHRAE, 2010.

7.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR DO PRÉDIO BASE

Conforme apêndice G da norma utilizada, uma edificação de mais cinco andares deve utilizar para o prédio base um sistema de condicionamento de ar por água gelada e caixas VAV. O sistema de água gelada é um sistema de expansão indireta composto por chiller, caldeira para aquecimento de água e *fancoils*. Os dados desse sistema informados no *EnergyPlus* foram de um sistema fechado, com bombeamento primário e secundário.

O coeficiente de performance (COP) do chiller, elétrico e resfriado a ar é de 2,78 e as temperaturas de água de entrada e saída do chiller são respectivamente 7°C e 12°C.

7.5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO PRÉDIO EXISTENTE

Para realizar a comparação com o prédio base, foi construída a maquete eletrônica do prédio existente. Esta comparação será feita para atestar uma economia de energia anual maior de 12%. Este valor é o mínimo exigido para atingir pontuação no quesito energia da certificação LEED.

Os valores dos coeficientes das superfícies opacas do prédio estão na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Características construtivas do prédio existente

Superfície	Coeficiente global de transferência de calor [W/m ² .K]
Telhado	1,44
Paredes internas	3,38
Paredes externas	3,38
Piso interno	2,27
Piso externo	2,27

Para as janelas, foi utilizado um SHGC igual a 0,39, transmitância térmica de 5,15 [W/m².K] e uma transmitância visível de 0,35 [W/m².K].

7.6. CARGAS INTERNAS DO PRÉDIO EXISTENTE

As cargas de iluminação podem ser modificadas, uma vez que se está seguindo valores recomendados pela norma ASHRAE Standard 90.1, 2010 bem como foi reduzido o número de pessoas para o prédio existente pelo mesmo motivo. As cargas de equipamentos foram mantidas as mesmas do prédio base.

7.6.1. ILUMINAÇÃO

Para o prédio existente foi utilizada uma densidade de potência de iluminação de 9 W/m².

7.6.2. PESSOAS E EQUIPAMENTOS

O número de pessoas foi definido pela área das zonas, estimando-se 6 m²/pessoa. A carga de equipamentos, diretamente relacionada com o número de pessoas, pela utilização de computadores, impressoras e outros foi definida em 16 W/m².

7.6.3. INFILTRAÇÃO

Os valores das trocas utilizadas para os ambientes no prédio base foram mantidos e atendem a norma ASHRAE, 2010.

7.7. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR DO PRÉDIO EXISTENTE

Nesta aplicação, o sistema de ar condicionado, assim como as cargas de iluminação, não segue as recomendações da norma. As mesmas referem-se apenas ao prédio base. Desta forma, o sistema utilizado no prédio existente é do tipo volume de refrigerante variável (VRF - *variable refrigerant flow*) que consiste em equipamentos de expansão direta, podendo atender, com uma única unidade externa, diversas unidades internas, sendo estas controladas pelos usuários de cada ambiente separadamente. Este sistema é compacto e eficiente.

O coeficiente de performance (COP) do VRF é de 3.

7.8. RESULTADOS PRELIMINARES

Seguindo a metodologia e com a finalidade de verificar se o prédio existente está na condição de ser certificado, analisaram-se os resultados do consumo energético de ambos. Esses resultados podem ser visualizados na tabela abaixo:

Tabela 7.3 – Comparação do consumo anual das edificações

	Consumo total [kW.h/ano]
Prédio base	1.123.136
Prédio existente	942.762

A redução do consumo de energia do prédio existente em relação ao prédio base é de 16%. Baseando-se nesse resultado, afirma-se que o prédio existente se enquadra na certificação LEED e pode ter sua pontuação melhorada.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1. CONSUMO DO PRÉDIO EXISTENTE

Como já apresentado nos resultados preliminares, o prédio existente apresentou um consumo de 942.762kW.h/ano. Deste valor, 201.454 kW.h são de utilização do ar condicionado, 230.580 kW.h são de iluminação e 490.419 kW.h são para equipamentos e 20.307 kW.h ventiladores.

8.2. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

A seguir, são apresentadas algumas propostas de melhorias para o prédio existente, no intuito de melhorar sua eficiência energética.

8.2.1. ALTERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CLIMATIZAÇÃO

Assim como no prédio existente, no prédio proposto calculou-se a carga térmica de cada zona. A carga térmica é calculada pelo *EnergyPlus* utilizando o arquivo climático e os dias de projeto para Porto Alegre, com o objetivo de obter as máximas potências de refrigeração para os ambientes.

Como as cargas térmicas se mantiveram, as unidades evaporadoras não foram substituídas, bem como não foi alterada a potência de cada unidade condensadora. O sistema continua sendo o VRF, pelo fato de ser um sistema mais eficiente, conforme Carotenuto, 2010.

A alteração proposta baseia-se na substituição do modelo dos equipamentos utilizados. A escolha deve-se ao coeficiente de performance do equipamento do fabricante Daikin, 2017 apresentar valores superiores a alguns modelos próprios e de concorrentes, conforme apresenta em seus catálogos.

Para a seleção das unidades condensadoras, as zonas térmicas foram agrupadas por pavimento, formando oito grupos. A tabela 8.1 mostra as unidades condensadoras selecionadas para o prédio. A seleção de cada grupo leva em conta a soma das cargas térmicas dos ambientes climatizados de cada pavimento.

Tabela 8.1 – Modelos das condensadoras do prédio proposto

Grupo	Modelo escolhido	Carga térmica calculada [W]	Capacidade de Refrigeração [W]	Coefficiente de performance
Grupo - Térreo	RHXYQ36AYL	98.620	102.000	4,15
Grupo - 2º Pavimento	RHXYQ54AYL	148.978	151.000	4,16
Grupo - 3º Pavimento	RHXYQ54AYL	149.598	151.000	4,16
Grupo - 4º Pavimento	RHXYQ54AYL	149.007	151.000	4,16
Grupo - 5º Pavimento	RHXYQ54AYL	148.443	151.000	4,16
Grupo - 6º Pavimento	RHXYQ54AYL	147.958	151.000	4,16
Grupo - 7º Pavimento	RHXYQ56AYL	153.791	157.000	4,11
Grupo - Cobertura	RHXYQ62AYL	171.209	173.000	3,96

8.2.2. ALTERAÇÃO DOS VIDROS

Para a substituição dos vidros da edificação segue-se o critério de escolher vidros termicamente eficientes. Procurou-se no catálogo do fabricante vidros adequados nesse sentido e preferencialmente na cor do prédio existente que é azul. (Guardian, 2017)

Os vidros testados são apresentados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Vidros simulados – escolhidos a partir do catálogo do fabricante (Guardian, 2017).

	Tipo	Cor	Espessura [mm]	U [W/m ² .K]	Fator solar [%]	Transmissão visível [%]	Redução [%]
Vidro 1 - Light Blue 63	Laminado	Azul	4mm+PVB 0,38mm+4mm	5,16	0,49	0,58	2,29
Vidro 2 - Royal Blue 20	Monolítico	Azul	6mm	4,34	0,36	0,23	4,09
Vidro 3 - Royal Blue 20	Insulado	Azul	6mm+ ar 12mm+6mm	2,56	0,27	0,21	5,29
Vidro 4 - Royal Blue 40	Insulado	Azul	6mm+ ar 12mm+6mm	1,79	0,32	0,38	5,42
Vidro 5 - SN 66	Insulado	Azul	6mm+ ar 12mm+6mm	1,62	0,32	0,43	5,06

Na tabela acima, o U é o coeficiente global de transmissão térmica e PVB é uma película de polivinil butiral, segundo o fabricante (Guardian, 2017). Os vidros apresentados foram simulados e o consumo energético do prédio para cada opção foi analisado. O vidro que apresentou o melhor rendimento térmico foi o vidro 4 – Royal Blue 40 e a economia de energia, comparada ao prédio existente, é de 5,42%.

8.2.3. UTILIZAÇÃO DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Optou-se, no intuito de reduzir o consumo energético da edificação, pelo uso de um controle de iluminação natural. O prédio é, na sua maior parte, envidraçado, o que facilita o uso deste recurso. No prédio existente, a iluminação é completamente fornecida por luz artificial.

Para cada zona térmica, são declarados dois pontos de controle. Com estes pontos, o programa calcula o quanto de iluminação está no ambiente e o quanto a iluminação elétrica pode ser reduzida. Por fim, a iluminação pode se dar inteiramente natural ou pode ser um misto de luz natural e luz elétrica, mantendo sempre a intensidade de iluminação para este tipo de ocupação.

8.2.4. ALTERAÇÃO DAS SUPERFÍCIES OPACAS

Ainda na intenção de melhorar a eficiência térmica e energética da edificação, foi proposto o isolamento das superfícies opacas. Desta forma foi aplicado, em cada superfície, o material lã de rocha para isolar termoacusticamente as zonas térmicas. Porém, esse isolamento, segundo os resultados da simulação, apresentou uma economia de apenas 1% no consumo de energia total da edificação.

8.2.5. PRÉDIO PROPOSTO

Após realizar a análise de cada uma das alterações propostas separadamente, foi realizada a superposição das mesmas de forma que se tem um novo prédio. O prédio com todas as modificações será chamado de prédio proposto e terá, em comparação com o prédio existente, alteração dos seus vidros, seu sistema de ar condicionado, utilização de iluminação natural e isolamento das superfícies opacas.

8.3. COMPARAÇÃO ENTRE O PRÉDIO EXISTENTE E O PRÉDIO PROPOSTO

A comparação entre o consumo de energia elétrica mensal da edificação proposta e do prédio existente pode ser observada nos gráficos das figuras a seguir.

A evolução do consumo mensal da iluminação das edificações é apresentada na figura 8.1.

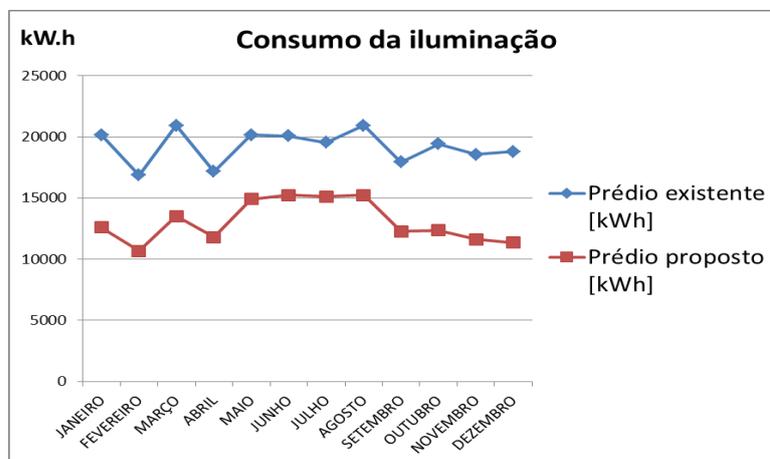


Figura 8.1 – Gráfico do consumo de energia da iluminação.

O gráfico mostra uma redução do consumo de energia da iluminação. A redução se deve ao uso do controle de iluminação natural. Este recurso representa um valor de 32% de economia na comparação com este item. Analisando a redução total do consumo de energia do prédio proposto, a alteração do sistema de iluminação representa 7,8%.

O gasto de energia com o sistema de ar condicionado foi reduzido em 40,68% na comparação com o prédio existente. Este valor de redução do consumo de energia em relação ao total é de 8,7%. Essa diminuição se deve à alteração do coeficiente de performance dos equipamentos com a alteração do modelo dos mesmos, bem como pelas alterações arquitetônicas do prédio que foram a substituição dos vidros, das superfícies opacas, utilização do controle de iluminação natural e pode ser visualizada na figura 8.2, que apresenta o gráfico de consumo do mesmo.

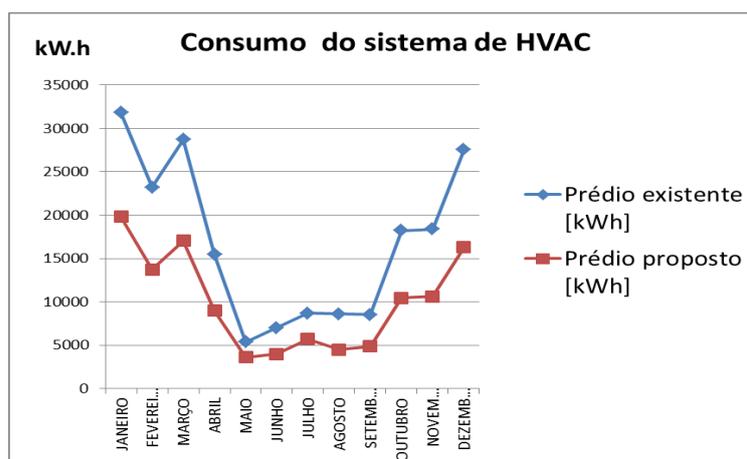


Figura 8.2 – Gráfico do consumo de energia do sistema de ar condicionado.

O consumo relativo aos equipamentos não teve variação, pois utilização dos equipamentos se manteve.

O gráfico apresentado na figura 8.3 mostra o valor total de consumo de energia e este abrange os gastos de iluminação, equipamentos, ventiladores, aquecimento e resfriamento.

O consumo total anual do prédio proposto é 779.670 kW.h enquanto o valor do consumo total do prédio existente é de 942.761 kW.h.

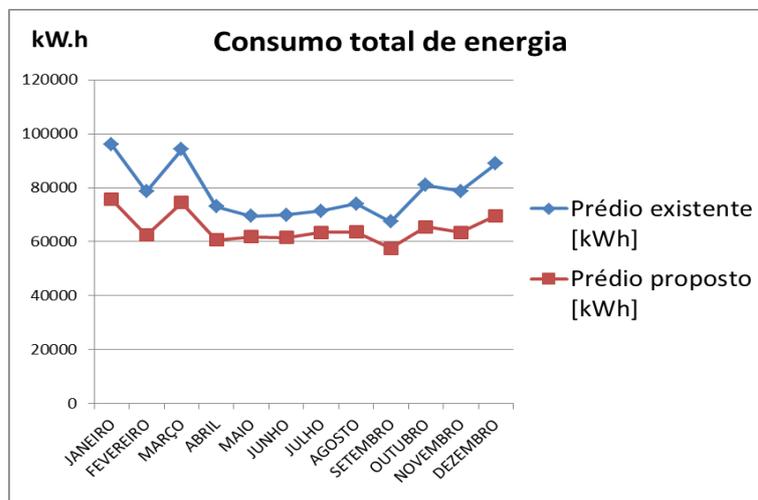


Figura 8.3 – Gráfico do consumo de energia total dos prédios existente e proposto.

A comparação dos gastos do prédio proposto frente ao existente, dos valores totais é apresentado no gráfico da figura 8.4. A redução total do consumo de energia é de 17,3%.

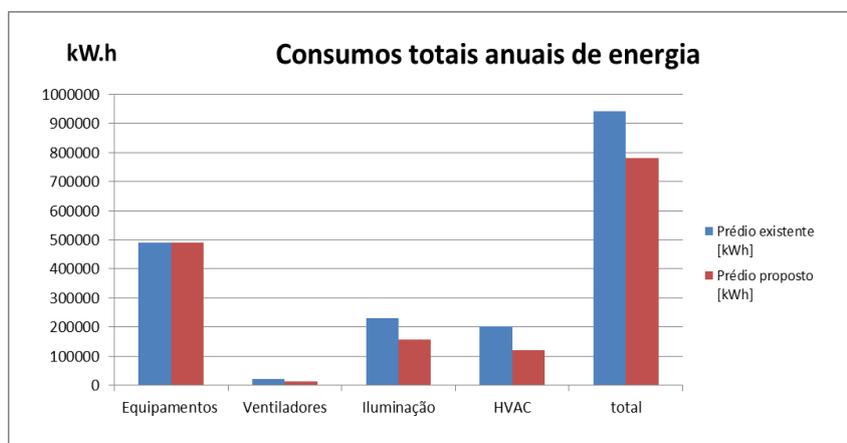


Figura 8.4 – Gráfico de comparação entre todos os consumos de energia do prédio existente e proposto.

A seguir, é apresentado na figura 8.5 o gráfico comparativo dos consumos de todas as edificações simuladas, onde se pode ver a economia do prédio proposto frente ao prédio base, que foi de 30,5%. Desta forma, o mesmo pode ser certificado no selo LEED em nível energético melhor com o qual o prédio existente foi certificado.

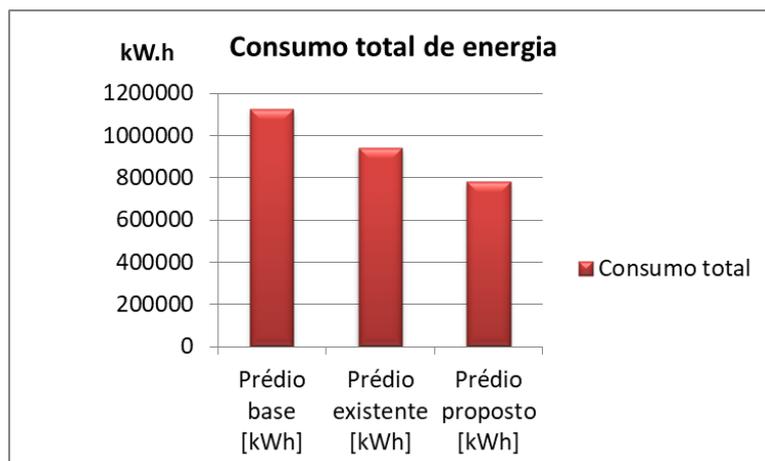


Figura 8.5 – Gráfico de comparação entre os consumos totais de energia de todos os prédios.

9. CONCLUSÕES

Verifica-se a possibilidade de melhorar a eficiência termoenergética da edificação estudada através das alterações propostas. O controle de iluminação natural mostrou-se um grande aliado na redução do consumo de energia elétrica, assim como a utilização de equipamentos de climatização com melhor coeficiente de performance.

A análise termoenergética com a utilização do *EnergyPlus* se mostra como uma ferramenta muito importante para a tomada de decisões e para a percepção da influência que cada fator ou alteração tem no comportamento termoenergético da edificação.

Avaliando a certificação LEED pode se concluir que esta é uma incentivadora na construção de prédios econômicos e sustentáveis. Nesse trabalho, foi avaliado o item que trata da eficiência energética das edificações e foi visto que a certificação é criteriosa e abrange medidas que vão desde a concepção até a utilização da edificação. Ficou confirmado também que as pontuações e percentuais de economia de energia propostas pela certificação são possíveis de serem alcançadas e têm um resultado positivo quanto ao seu consumo.

Conclui-se assim que é possível atingir reduções significativas de consumo de energia em edificações, realizando alterações arquitetônicas e de climatização e que estas possibilitam construir prédios de forma menos agressiva ao meio ambiente.

O trabalho em questão, não tratou da análise de viabilidade econômica e nem de retorno de investimento. Fica como sugestão para trabalhos futuros essa análise para verificar o quão viável é realizar as alterações propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2010.

ASHRAE; “**Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings**”. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2010. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., SI Edition, Atlanta, USA, 2010.

Beltram, L.; **“Simulação computacional do desempenho energético de uma edificação comercial”** Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Beyer, P.; **“Apostila de Climatização”** – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016

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

Daikin; **“VRVInova”**, <http://www.daikin.com.br/static/uploads/conteudos/produtos/170523081235000000.pdf>. Acessado em 15/10/2017.

EnergyPlus; **“EnergyPlus Engineering Document – The Reference to EnergyPlus Calculation”**, Version 6.0., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2017.

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, 2017.

Guardian; **“Manual Técnico”**, http://www.sa.pt.sunguardglass.com/cs/groups/sunguardsouthamerica/documents/web_assets/gi_002781.pdf. Acessado em 30/09/2017.

Green Building Council Brasil. **“Certificação LEED”**, <http://www.gbcbrazil.org.br/index.php>. Acessado em 02/10/2017.

Green Building Council USGBC. **“LEED Scorecard”**, <https://www.usgbc.org>. Acessado em 02/10/2017.

Knijnik, D. C.; **“Aplicação da norma ASHRAE 90.1 e da certificação LEED em edificação comercial”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LABEE; **“Arquivos Climáticos”**, <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acessado em 21/08/2017.

Ministério de Minas e energia; **“Cartilha de energia”**, <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/cartilha+ENERGIA+op1.pdf>. Acessado em 14/10/2015

Souza, L. C.; **“Avaliação termo-energética de um edifício segundo critérios de prédios verdes”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

APÊNDICE A – PLANTAS BAIXAS DA EDIFICAÇÃO

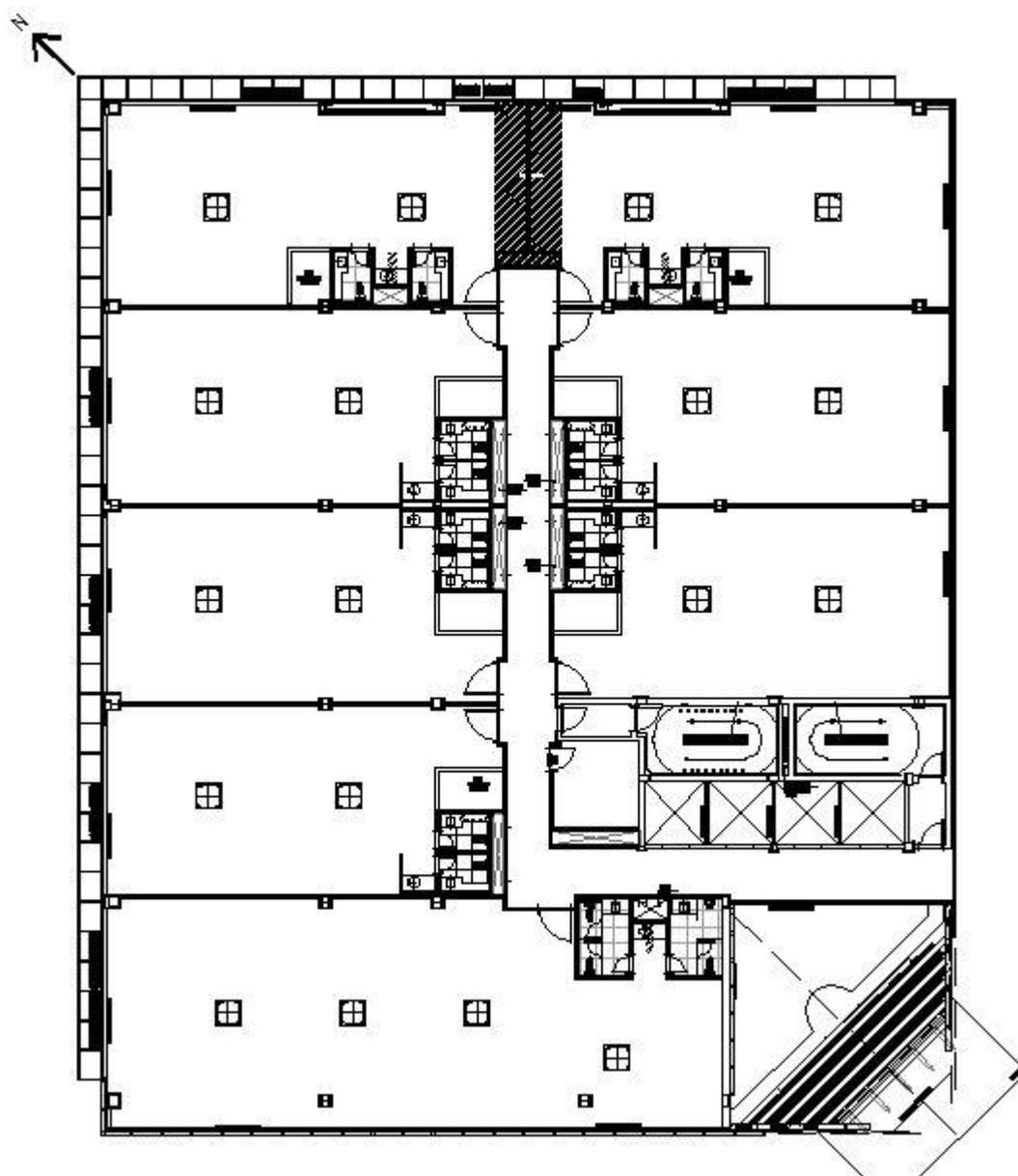


Figura A.1 – Planta Baixa pavimento Típico

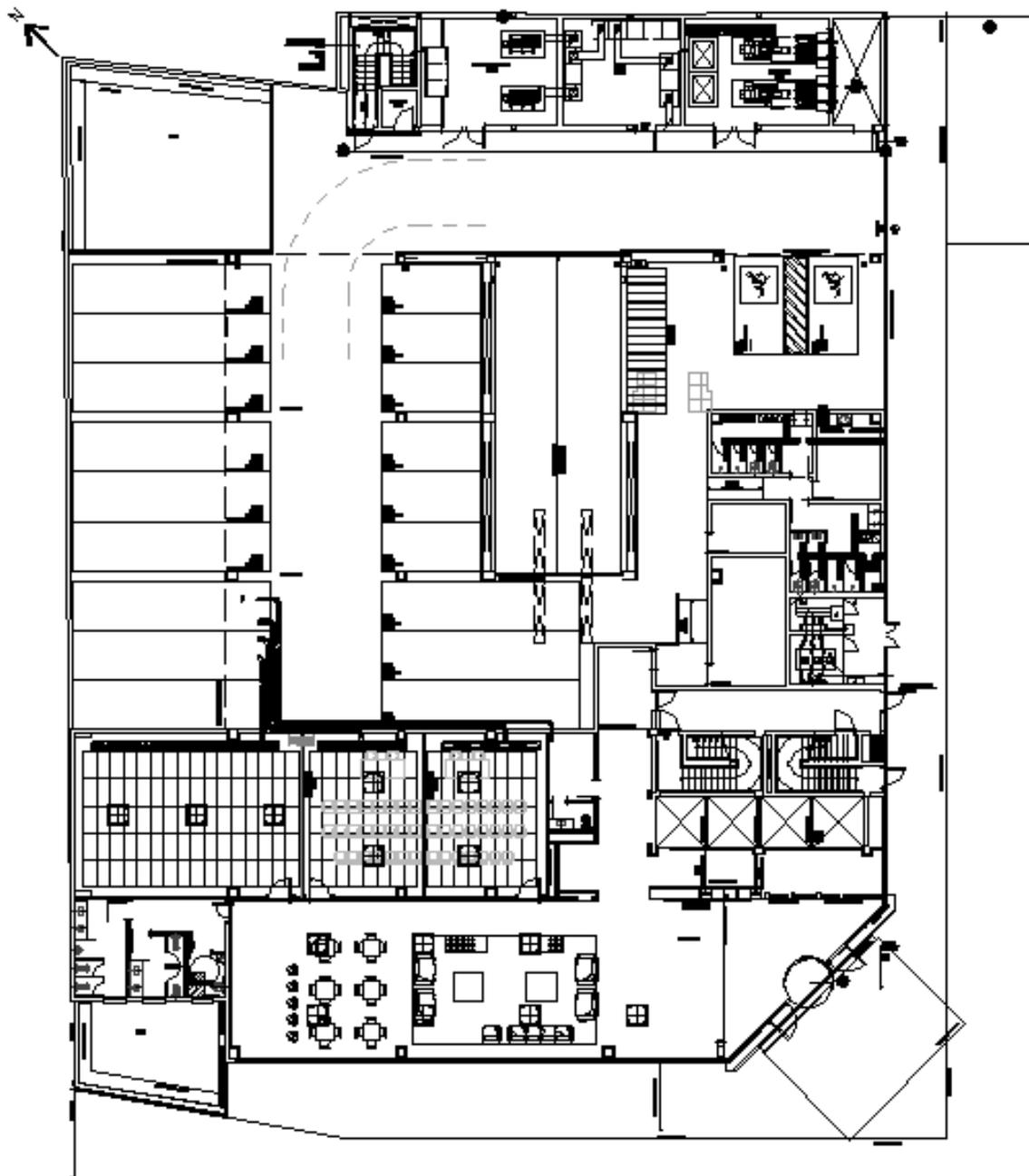


Figura A.2 – Planta Baixa pavimento Térreo

APÊNDICE B – DIVISÃO DAS ZONAS TÉRMICAS NOS PAVIMENTOS

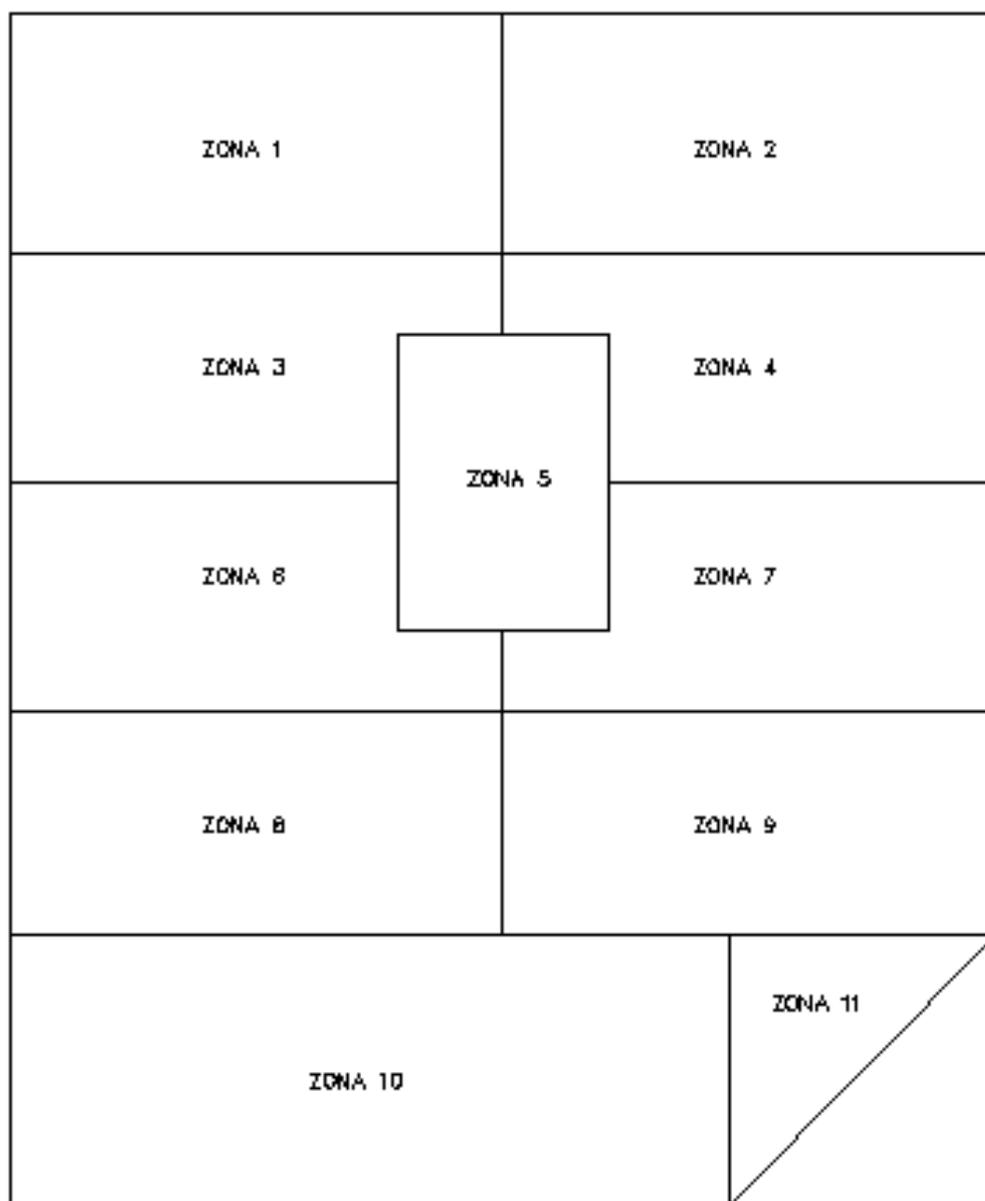


Figura B.1 – Divisão das zonas térmicas no pavimento Típico

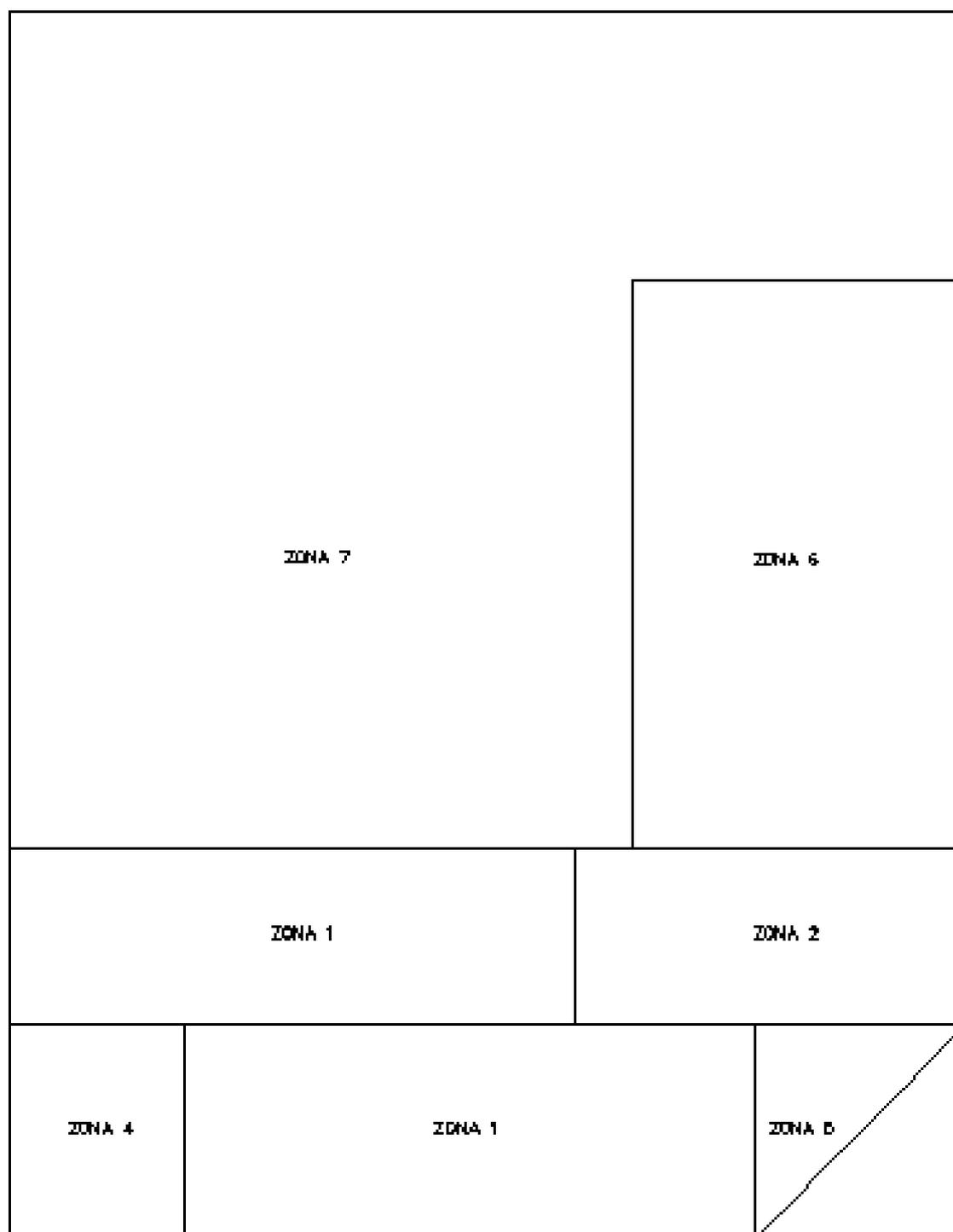


Figura B.1 – Divisão das zonas térmicas no pavimento Térreo