

Universidade Federal de Pernambuco
Centro De Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Thiago da Costa Melo

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES EM
RECIFE UTILIZANDO O ENERGYPLUS**

Recife

2018

Thiago da Costa Melo

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES EM
RECIFE UTILIZANDO O ENERGYPLUS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Eficiência Energética,

Orientação: Prof^o. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires.

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M528e Melo, Thiago da Costa.

Eficiência energética e conforto térmico em edificações em Recife utilizando o Energyplus / Thiago da Costa Melo. 2018.

76f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Eficiência energética. 3. Simulações termo energéticas. 4. Energyplus. I. Pires, Tiago Ancelmo de Carvalho (Orientador). II. Título.

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2018/ 201

Thiago da Costa Melo

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES EM
RECIFE UTILIZANDO O ENERGYPLUS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 12 de março de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Tiago Ancelmo, de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE
(Orientador)

Prof.^a Dr.^a Paula Maria Wanderley Maciel do Rêgo Silva - UNICAP
(Examinadora externa)

Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva - UFPE
(Examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, minha mãe, meu irmão e à minha esposa, por me apoiarem ao longo dessa empreitada. Agradeço ao meu pai (*in memoriam*) por compartilhar o apreço pela profissão e ser minha grande referência profissional. Aproveito para agradecer também a toda a minha família e amigos, em especial aqueles contribuíram diretamente e indiretamente para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço aos colegas, amigos e profissionais da empresa em que trabalho por contribuírem com seus conhecimentos, opiniões e perdoarem algumas ausências reconhecendo a importância desta pesquisa para mim. Agradeço, também, ao meu orientador, professor Tiago Ancelmo, por embarcar nessa pesquisa “pioneira” para Universidade, mesmo ciente de todas as dificuldades que iriam aparecer. Além de agradecer à todos os demais professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE.

O segredo do sucesso passa pela maior eficiência, ao produzir a maior reação pela mesma ação realizada.

Dimos Iksilara

RESUMO

O aumento da demanda energética é uma das maiores preocupações para o desenvolvimento sustentável das principais nações mundiais para as próximas décadas. A presente dissertação tem por objetivo ilustrar o potencial de economia no consumo energético e de melhorias no conforto térmico interno nas edificações, através de simulações computacionais termo energéticas. Mostrando as simulações computacionais como uma ferramenta na tomada de decisões para parâmetros geométricos, como orientação e forma das edificações, e para a escolha dos materiais constituintes da mesma; garantindo assim uma maior eficiência tanto nos projetos de novas edificações, quanto nas requalificações de estruturas já existentes. As possibilidades de usos das simulações termo energéticas são bastante abrangentes, e podem avaliar uma vasta gama de parâmetros. Aqui, com o auxílio do software Energyplus, avaliamos e comparamos as mais típicas composições, já consolidadas, de vedação para paredes empregadas na construção civil brasileira, como alvenarias de blocos cerâmicos e de concreto de diversos tipos; além de considerarmos, também, algumas tipologias construtivas que vem galgando um maior espaço no cenário da construção civil nos últimos anos, como vedações em painéis pré-moldados de concreto, drywall de uso externo e até contêineres frente ao conforto térmico nas edificações e seus impactos aos ocupantes, medido através do indicador grau-hora e seu consumo energético fornecido pelo software. Em uma segunda etapa, foram avaliadas, para a mesma edificação modelo, os impactos, no que diz respeito às mesmas variáveis supracitadas, agora, em relação à mudança de sua orientação no terreno. Sendo escolhido um dos materiais, o qual obteve resultados medianos na primeira avaliação. Ambas as comparações consideraram uma edificação submetida ao clima tropical úmido de Recife, cidade situada na região nordeste do Brasil. Foi, desta forma, possível avaliar a redução de cerca de 23,71% no consumo de energia quando comparadas as tipologias construtivas e de cerca de 5,37% quando consideradas as alterações na orientação da edificação. Já com relação ao indicador grau-hora foi possível observar diferenças de 24,91%, em umas das zonas térmicas da edificação, quando comparados os tipos de vedação e 13,93% quando comparadas as mudanças na orientação da edificação.

Palavras-chave: Eficiência energética. Simulações termo energéticas. Energyplus.

ABSTRACT

Rising energy demand is one of the biggest concerns for the sustainable development of major world nations for the coming decades. The aim of this dissertation is to illustrate the potential of saving energy consumption and improvement of thermal comfort in buildings, through computational simulations. Showing the computational simulations as a tool in the decision making for geometric parameters, as orientation and form of the buildings, and for the choice of the constituent materials of it; thus ensuring greater efficiency both in the design of new buildings and in the requalification of existing structures. The possibilities of uses of the thermoenergetic simulations are quite broad, and can evaluate a wide range of parameters. Here, with the aid of the Energyplus, we evaluate and compare the most typical compositions, already consolidated, for walls used in brazilian civil construction, such as masonry of ceramic blocks and concrete of various types; in addition to considering some constructive types that have been increasing in the civil construction scenario in recent years, such as prefabricated concrete panel, drywall for external use and even containers, as regards to thermal comfort in buildings and their impacts to the occupants, measured by the index of degree hour and its energy consumption provided by the software. In a second evaluation, with respect to the same variables mentioned above, were observed the impact of the change of its orientation in the site. One of the materials was chosen for the standard bulding, which obtained medium results in the first evaluation. Both comparisons performed for a building inserted in a humid tropical climate of Recife, city located in northeastern Brazil. It was possible to evaluate the reduction of about 23.71% in energy consumption when compared to the construction typologies and of about 5.37% when considering the changes in the orientation of the building. Regarding the index degree hour, it was possible to observe differences of 24.91% in one of the thermal zones of the building, when comparing the types of walls and 13.93% when comparing the changes in the orientation of the building.

Keywords: Energy efficiency. Thermo energy simulation. Energyplus

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Escala de Sensação Térmica.....	20
Figura 2. Identificação das Zonas Térmicas da Edificação Modelo	33
Figura 3 - Dados de entrada – Geometria.....	34
Figura 4 - Parâmetros de Simulação - Simulation Control.....	35
Figura 5 - Parâmetros de Simulação – Building	36
Figura 6 - Parâmetros de Simulação – ShadowCalculation	36
Figura 7 - Arquivos Climáticos - Site Location	38
Figura 8 - Arquivos Climáticos - Sizing Period.....	38
Figura 9 - Arquivo Climático - Site Ground Temperature.....	39
Figura 10 - Cargas internas - Schedule Type Limits.....	40
Figura 11 - Cargas Internas - Schedule Compact.....	42
Figura 12 - Cargas Internas - Schedule Compact 2	43
Figura 13 - Propriedades Termo Físicas – Materiais.....	45
Figura 14 - Propriedades Termo Físicas - Resistência das Camadas de Ar.....	45
Figura 15 - Propriedades Termo Físicas - Window Material Glazing.....	46
Figura 16 - Propriedades Termo Físicas – Construction	47
Figura 17 - Propriedades Termo Físicas - Geometry Rules.....	47
Figura 18 - Propriedades Termo Físicas – Zone.....	48
Figura 19 - Propriedades Termo Físicas - Building Surface Detailed.....	49
Figura 20 - Propriedades Termo Físicas - Fenestration Surface Detailed	49
Figura 21 - Cargas Internas - Atividade dos Ocupantes	50
Figura 22 - Cargas Internas – Iluminação	51
Figura 23 - cargas Internas - Equipamentos Elétricos	51
Figura 24 - Ventilação - Simulation Control.....	53
Figura 25 - Ventilação – Zone	54
Figura 26 - Ventilação – Surface.....	56
Figura 27 - Ventilação - Detailed Opening	56
Figura 28 - HVAC – Termostato.....	57
Figura 29 - HVAC – Split.....	58
Figura 30 - HVAC – Sistema	58
Figura 31 - Output - Variable Dictionary	59
Figura 32 - Output - Table Style.....	60
Figura 33 - Output – Variable	61
Figura 34 - Output – Meter.....	61
Figura 35 - Simulações com relação a orientação da edificação	68
Figura 36 - Direção dos Ventos para a Cidade de Recife	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas Internas - Atividade dos Usuários	41
Tabela 2 - Cargas Internas – Equipamentos	42
Tabela 3 - Características Termo Físicas.....	44
Tabela 4 - Potência de Iluminação	50
Tabela 5 - Resumo dos Indicadores Grau Hora	64
Tabela 6 - Resumo dos Indicadores Grau Hora.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 1 para diferentes materias de envoltória	63
Gráfico 2 - Resumo dos Indicadores Grau Hora para diferentes materias de envoltória	64
Gráfico 3 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 2 para diferentes materias de envoltória	64
Gráfico 4 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 3 para diferentes materias de envoltória	65
Gráfico 5 - Consumo Anual de Energia para diferentes materias de envoltória	66
Gráfico 6 - Comparação de Temperaturas das Zonas 1 para diferentes orientações ..	68
Gráfico 7 - Resumo dos Indicadores Grau Hora para Diferentes Orientações	69
Gráfico 8 - Comparação de Temperaturas das Zonas 2 para diferentes orientações ..	69
Gráfico 9 - Comparação de Temperaturas das Zonas 3 para diferentes orientações ..	70
Gráfico 10 - Consumo Anual de Energia para Diferentes Orientações	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	CONFORTO TÉRMICO.....	16
2.1.1	Índices de Conforto	19
2.1.2	Definição das Temperaturas De Conforto	21
2.2	REGULAMENTAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS.....	21
2.3	DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES.....	24
2.4	PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	25
2.4.1	Equações do Energyplus	26
2.5	DESCRIÇÃO METODOLÓGICA.....	29
3	ESTUDO DE CASO	31
3.1	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	31
3.1.1	Geometria do Estudo	32
3.1.2	Parâmetros de Simulação	34
3.1.3	Arquivos Climáticos	37
3.1.4	Parâmetros de Cargas Internas e Utilização da Edificação	40
3.1.5	Parâmetros de Entrada das Características Termofísicas das Envolórias	43
3.1.6	Parâmetros de Entrada da Ventilação	52
3.1.7	Parâmetros de Saída	59
3.2	RESULTADOS.....	63
3.2.1	Avaliação do Impacto da Mudança dos Materiais de Vedação	63
3.2.2	Avaliação do Impacto do Mudança da Orientação da Locação da Edificação	67
4	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento populacional a nível mundial acontece em ritmo acelerado e o consumo de energia acompanha esta mesma crescente, com novos equipamentos e tecnologias que aparecem para garantir um maior conforto e qualidade de vida aos seres humanos. Entretanto, estes equipamentos consomem cada vez mais energia e são cada vez mais acessíveis, aumentando consideravelmente o consumo de energia no planeta. Para as edificações não é diferente; em busca de mais conforto, as edificações estão cada vez mais equipadas com aparelhos que garantem a regulação da temperatura do ar e da água, da iluminação adequada dos ambientes, aparelhos que facilitam a vida das pessoas e etc., equipamentos estes que em sua maioria são elétricos.

Estima-se que a demanda de energia elétrica, no Brasil, apenas no setor residencial cresceu 46,25% entre 2007 e 2016, de acordo com o (EPE, 2016). O que se reflete no aumento de consumo da ordem de 42.035GWh. Já nos Estados Unidos, cerca de 41% da energia primária é consumida por edificações (Duarte, 2014); o autor ainda diz que 46% do consumo energético das edificações no Brasil é devido ao condicionamento de ar, nos Estados Unidos este percentual é ainda maior atingindo cerca de 50%; e na China atinge cerca de 35% do consumo total das edificações.

Estes altos níveis de consumo podem ser atribuídos à diversos fatores, como a facilitação ao acesso destes equipamentos, à utilização de equipamentos antigos e ineficientes e a má utilização dos mesmos, mas também, à falta de estudos para elaboração e execução de projetos adequados a cada localidade e funcionalidade. O que se deve à uma padronização dos métodos construtivos, que ora é devido ao aumento de produtividade das empreiteiras, ora devido à regulamentação de projetos de inclusão habitacional. Almeida (2014) afirma que as unidades habitacionais construídas seguem padrões construtivos, os quais são adotados em toda extensão do território nacional, e não há diferenciação das características climáticas locais e até da disponibilidade de materiais na região.

A elaboração de projetos inadequados ao clima local, pode gerar um consumo adicional e desnecessário, principalmente no que diz respeito à climatização das edificações, para que haja uma compensação no conforto térmico. Portanto, conforme Ferreira (2016), foram criadas as NBRs NBR 15.220 e NBR 15.575 com o intuito de regular o desempenho térmico mínimo de uma edificação a nível nacional. Ainda segundo a autora, a NBR 15.575 regulamenta três métodos de avaliação do desempenho térmico de uma edificação: Através do método simplificado (método prescritivo), através de simulações computacionais, e através de medições em loco, que serão brevemente explicados no decorrer da dissertação.

Uma gama de fatores o quais podem influenciar diretamente no desempenho térmico das edificações. Aqui, na presente dissertação, serão isolados alguns

destes fatores, a partir das tipologias construtivas mais utilizadas no país, para que seja possível identificar e comparar sua real contribuição no desempenho térmico das edificações. Dentre os fatores podemos citar: condutividade térmica, densidade dos materiais, calor específico e absorvância. Estas comparações serão apresentadas, no presente trabalho, através de simulações computacionais termo energéticas, elaboradas no Energyplus, software americano largamente utilizado a nível acadêmico e profissional.

A fim de ilustrar o potencial da ferramenta será mostrado, dentre os inúmeros parâmetros que podem ser considerados pela mesma, os impactos das alterações da escolha dos materiais constituintes das vedações de uma edificação modelo frente ao seu conforto térmico interno, medido através do indicador grau hora e seu consumo energético, considerando uma edificação submetida ao clima tropical úmido de Recife, cidade na região nordeste do Brasil. Além dos impactos, frente as mesmas variáveis, da variação da orientação da locação da mesma edificação no terreno.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Avaliar, através de simulações computacionais, os impactos das escolhas de itens projetuais, no que diz respeito à escolha dos componentes e da geometria da edificação, de forma que seja possível a opção consciente de cada material sabendo seus reais impactos, em relação à conforto térmico e consumo energético, ao longo de toda a vida útil do projeto baseado em subsídios técnicos calculados e comprovados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Analisar a influência dos materiais da envoltória no comportamento térmico e o consumo energético de edificações residenciais. Considerando a substituição dos materiais construtivos das vedações, e todas as suas propriedades termo físicas, submetidas a condições ambientais idênticas. No presente trabalho serão considerados oito tipos de vedações comumente utilizadas na construção civil, a fim de contribuir para tomadas de decisões práticas no setor.
- b. Verificar os impactos do comportamento térmico e o consumo energético de edificações residenciais, agora testada frente a variação da orientação da locação desta edificação no terreno. Serão avaliadas quatro posições para edificações submetidas às mesmas rotinas de ocupação e materiais de envoltórias;
- c. Comparar e avaliar as variações dos consumos energéticos que cada alteração de parâmetro físico e geométrico acarreta para edificação, agora numa ótica financeira. Comparando os custos acarretados pela variação de consumo energético ao longa da vida útil da edificação;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo inicial da presente dissertação discorre acerca do assunto abordado no decorrer de todo o texto, justificando a motivação na escolha do mesmo, além de expor os objetivos, gerais e específicos, que se pretendia atingir.

O segundo capítulo é dividido em quatro partes, onde as primeiras apresentam uma revisão de literatura dos principais temas abordados no estudo: (1) o histórico básico e a importância das regulamentações energéticas para edificações; (2) as normatizações e demais regulamentações adotadas no Brasil e exterior; (3) e os conceitos básicos sobre conforto ambiental e sobre as simulações e apresentação dos softwares utilizados. E a última parte encontrada neste capítulo faz uma consideração final sobre os temas abordados na revisão de literatura.

No terceiro capítulo são detalhadamente descritos os métodos aplicados a cada uma das partes do estudo, iniciando com o método para obtenção dos dados e a caracterização das simulações; a apresentação dos indicadores de conforto adotados no trabalho; e por fim, os procedimentos para realização da análise para a avaliação da influência dos parâmetros físico dos materiais adotados em cada simulação, bem como os parâmetros geométricos no que diz respeito à conforto e consumo energético.

O quarto capítulo expõe os resultados obtidos a partir da execução do método proposto. O capítulo é dividido em três partes, onde a primeira expõe a caracterização das simulações desenvolvidas, quanto à configuração dos ambientes que compõem as habitações e quanto às propriedades da envoltória; A segunda parte ilustra a avaliação das influências dos parâmetros físicos e geométricos no conforto ambiental a partir dos parâmetros normativos e dos indicadores grau hora; por fim serão avaliados os consumos relativos à variação deste mesmo parâmetro.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas ao fim do estudo, bem como as limitações encontradas no seu decorrer e as sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Ao tomar o tema conforto térmico como objeto de reflexão muitas possibilidades de análise aparecem imediatamente como derivações do assunto. Fato é que, na realidade atual ainda são restritas às repercussões de um tema de tamanha relevância. Os motivos para isso são os mais diversos, porém a dificuldade de análise em termos tão subjetivos parece ser um dos maiores obstáculos.

De acordo com Wallauer (2003), um ambiente confortável termicamente é aquele no qual existe um equilíbrio entre a produção de calor metabólico e as perdas e ganhos de calor do ar em o torno de um indivíduo. Já a NBR 15220 (ABNT, 2003), define o conforto térmico como “Satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”. Por sua vez, ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) configura conforto térmico como “...um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa”. Sendo as definições compostas de um forte conteúdo subjetivo.

Referindo-se ao tema, Frota (2001) afirma que os seres humanos requerem conforto térmico não apenas por uma condição de satisfação, mas também por uma questão fisiológica. A autora aponta que as condições ambientais podem favorecer ou prejudicar o funcionamento correto do organismo, e compara ainda o metabolismo dos animais a uma máquina térmica a qual precisa ter a temperatura regulada em torno de 37°C e, caso exposto à uma temperatura baixa, o metabolismo deve acionar mecanismos próprios para o aumento da temperatura corporal e caso contrário o inverso.

A mesma autora ainda atenta para o fato de que quando as trocas de calor entre os indivíduos e o ambiente ocorrem sem maior esforço, a sensação do indivíduo é de conforto térmico e, portanto, seu bem-estar e sua capacidade de trabalho são otimizadas. Para casos contrários, onde há um desequilíbrio, existe a sensação de frio e calor, quando o organismo está recebendo mais ou menos calor que o necessário para a manutenção da homeotermia - necessidade de estabilização da temperatura corporal em certo patamar – percebe-se situações de desconforto térmico nas quais a capacidade de trabalho e produtividade são afetadas negativamente e podendo, inclusive, gerar problemas de saúde.

Entretanto, as sensações de conforto, descritas por Frota (2001), são relativas e dependentes da fisiologia dos usuários. Cada indivíduo possui uma taxa metabólica diferente, o que influencia na sua percepção da temperatura do ambiente. Ferreira (2016) afirma que a taxa metabólica é a taxa de produção de calor que um corpo produz. A autora estabelece, ainda, que a taxa metabólica é função da atividade que o indivíduo desempenha, sendo parte da energia utilizada para execução da atividade e parte dissipada para o ambiente.

Ou seja, a depender da atividade desempenhada pelo indivíduo ele irá ter uma sensação térmica do ambiente diferente; mais calor em atividades que exijam

mais energia e menos calor em atividades mais tranquilas, tomando-se em análise o mesmo indivíduo submetido às mesmas condições ambientais.

Existem uma série de parâmetros adicionais que influenciam na sensação térmica dos indivíduos, como sexo, idade, biotipo, hábitos alimentares e etc. Bem como outro fator, apontando por Frota (2001), como influenciador da sensação térmica que é a vestimenta utilizada pelo indivíduo, quanto mais espessa e menos permeável forem as roupas usadas, mais isolado da temperatura externa o indivíduo estará e mais calor sentirá. O grau de vestimenta corpórea é mensurado a através do *clo* – unidade que mensura o quanto o indivíduo está isolado termicamente do ambiente.

Entretanto, ainda assim indivíduos com as mesmas características podem experimentar sensações térmicas diferentes. Portanto, como forma de mensurar a sensação térmica média criou-se uma equação, a partir de dados estatísticos levantados por meio de entrevistas com usuários submetidas às mesmas condições térmicas. Esta equação é chamada de PMV, sendo mais detalhada no item 2.1.1.

O PMV é um índice representativo da sensação térmica em determinado ambiente, o qual utiliza uma escala de sete ou nove pontos para definição do conforto de cada indivíduo (ASHRAE, 2001). Segundo Wallauer (2003), o PMV é originário dos estudos Fanger em 1970, sendo determinado através de uma correlação entre o metabolismo dos indivíduos e a carga térmica atuante sobre o corpo.

Os fenômenos de trocas de calor que ocorrem em uma edificação são processos extremamente dinâmicos, ocorrem a partir de diversas fontes, e através de diversos mecanismos, uma vez que é notória a constatação de Frota e Schiffer (2001) ao dizerem que o corpo humano está constantemente produzindo energia por meio do processos metabólicos convertendo assim os alimentos consumidos em energia útil para o desempenho de suas funções. De toda energia produzida, apenas uma parte dessa é utilizada em trabalhos externos ao corpo, havendo a necessidade de dissipar o excedente na forma de calor.

Uma vez dissipada para o entorno essa energia volta a figurar entre as variáveis do conforto térmico passíveis de avaliação. É possível constatar que o processo de liberação de energia corporal para o ambiente acontece de por meio de trocas de calor, especialmente sob duas formas: calor sensível e calor latente. De acordo com Ferreira (2016) o calor sensível abrange as trocas secas que são funções das variações de temperatura entre o corpo e o ambiente, além de considerar, também, os processos de condução de calor, convecção de calor e radiação térmica. Por sua vez, quando versa sobre calor latente, a autora o descreve como resultante da troca de massa envolvendo transformações no estado de agregação da água através da transpiração, o que abrange processos de difusão de massa e convecção de massa.

Dessa maneira, pode-se considerar como formas fundamentais de trocas térmicas e de massa entre o corpo e o ambiente em seu entorno o que fora

descrito por Fanger e reelaborado por Ferreira (2016), a saber como: Condução de calor sendo os processos de trocas de calor diretas através das superfícies em contato com o corpo e são função da diferença de temperatura no meio. Normalmente sua contribuição é restrita às trocas de calor através da vestimenta e no contato dos pés com o piso. Já a Convecção de calor, são os processos de trocas de calor entre a superfície do corpo ou da vestimenta e o ar adjacente e são função da temperatura das superfícies e das condições de temperatura e de velocidade do ar vizinho. Os processos de Radiação térmica são os aqueles de trocas de calor que envolvem as perdas ou ganhos diretos para o entorno e são função da temperatura das superfícies do entorno. Existem ainda os processos de Difusão e Evaporação que são as trocas térmicas decorrentes da difusão de vapor d'água e da evaporação do suor da pele e está limitada pela quantidade de água no ar (umidade relativa), pela velocidade do ar junto ao corpo e pela quantidade de suor que o organismo é capaz de produzir e que migra até a pele. Além de se considerar também a Respiração que é o processo que envolve as trocas de calor latente devido à dissipação de calor através das perdas de vapor de água pela respiração, além das trocas decorrentes da diferença de temperatura entre o ar e os pulmões (parcela sensível).

Dessa maneira, de acordo com o seguimento do raciocínio acima, pode-se dizer, de acordo com Ferreira (2016) que o conforto térmico é estabelecido quando das trocas de calor sensível e latente entre o corpo e o meio forem equilibradas à energia que precisa ser dissipada, bem como quando a temperatura da pele e o nível de suor, função do metabolismo, estiverem dentro de limites aceitáveis.

Os valores das taxas metabólicas podem ser obtidos por meio de dados tabelados na norma ISO 7730 (2005) e na norma ASHRAE 55 (2013). Pode-se também obter o valor da taxa metabólica por meio do consumo de oxigênio e da frequência de batimentos cardíacos, conforme a norma ISO 8996 (1990).

Cada uma dessas variáveis, segundo Ferreira (2016), tem atuações e influências equivalentes, entretanto, embora possuam maior influência sobre o conforto térmico, uma vez que atuam diretamente na dissipação de calor por convecção e radiação, a temperatura do ar e a temperatura média radiante não são suficientes para a caracterização do conforto térmico de um ambiente. A temperatura ideal é uma das questões mais importantes diante das avaliações dos usuários de uma edificação. Evans (2007), por sua vez, afirma que as variações de temperatura são essenciais para os vários recursos do desenho bioclimático.

De acordo com Ferreira (2016) quando considera-se climas quentes e úmidos, outro fator que assume papel de grande importância é a velocidade do ar, uma vez que se coloca como responsável, em grande proporção, por perdas convectivas e pelo favorecimento da evaporação do suor na pele proveniente do movimento do ar. Araújo (1996) pontuou que indivíduos eram mais sensíveis à velocidade do ar no clima quente e úmido de Natal - RN do que à temperatura do ar. Por sua vez, Nicol (2004) constatou que o movimento do ar pode chegar a ser equivalente à redução de até 4°C na temperatura em climas quentes e

úmidos no norte da Índia e Iraque. Novamente de acordo com Nicol (2004), resultados correspondentes, demonstrando que o limite superior da faixa de conforto pode ser expandido em até 2°C com o movimento do ar em climas tropicais podem ser encontrados em demais pesquisas.

Percebe-se a partir do supracitado que a definição do conforto térmico possui profundas implicações na maneira como uma edificação é projetada, bem como na quantidade de energia que será necessária para seu condicionamento ideal e o impacto resultante na qualidade do ambiente construído. Surgem assim, de acordo com Ferreira (2016), dois dos grandes objetivos diretamente relacionados ao desempenho de uma edificação, a saber: assegurar o conforto térmico em paralelo a limitar o consumo de energia.

A arquitetura e a engenharia têm como propósito servir ao homem em todos os aspectos que forem cabíveis a suas áreas de atuação. Dessa maneira, proporcionar conforto térmico e melhores condições de usufruto das edificações para realização das mais diversas atividades humanas, sem fadiga, estresse ou desgaste acima do necessário é desafio aceito. Sejam quais forem as condições climáticas externas, oferecer conforto térmico no interior das construções é um dos grandes objetivos.

As edificações, desde sempre, são estruturas que auxiliam e amenizam as condições ambientais às quais os seres humanos estão expostos, afirma Frota, (2001). São capazes, portanto, de viabilizar o bem-estar dos seus ocupantes, desde que adequadas a cada situação e utilização. A autora diz ainda que as edificações têm como uma de suas funções básicas oferecer condições térmicas compatíveis com conforto térmico humano dentro das edificações, independente das condições externas.

2.1.1 Índices de Conforto

Ao longo do tempo, identificou-se a necessidade de prever as condições ambientais de uma edificação, como intuito de estimar e garantir o conforto de seus ocupantes. Uma série de pesquisadores elaboraram metodologias com este intuito. Estas metodologias, envolvem variáveis locais das edificações, mas também aspectos referentes às atividades desempenhadas por seus ocupantes, em seu interior, conforme mencionado anteriormente.

Ferreira (2016), afirma que existem basicamente duas abordagens referentes aos índices de conforto térmico, cada uma com suas potencialidades e limitações: a abordagem analítica e a abordagem adaptativa. A abordagem analítica é aquela que utiliza dados de estudos realizados em câmaras climáticas para embasar a sua teoria. Já a abordagem adaptativa utiliza dados obtidos em estudos de campo. Nos dias de hoje, após uma série de estudos realizados, a abordagem analítica vem sendo utilizada com muita frequência, inclusive sendo recomendada em normas.

Os índices de conforto mais utilizados são atrelados aos Graus Hora e o PMV, metodologia adotada pela ASHRAE. Segundo Ferreira (2016) esta norma oferece uma escala de sensação térmica, que traduz e classifica a sensação

térmica em uma escala de valores de sete pontos, que são: Frio, Fresco, Levemente Fresco, Neutra, Levemente Morno, Morno e Quente.

O PMV é um índice representativo da sensação térmica em determinado ambiente, o qual utiliza uma escala de sete, ou nove pontos, para definição do conforto de cada indivíduo de acordo com a ASHRAE (2001). Este índice é função do tipo da atividade desempenhada, e o calor gerado devido à taxa metabólica, e as vestimentas de cada ocupante.

Figura 1 – Escala de Sensação Térmica

+3	Quente
+2	Morno
+1	Levemente Morno
0	Neutra
-1	Levemente Fresco
-2	Fresco
-3	Frio

Fonte:ASHRAE 55, 2013

De acordo com Ferreira (2016), o PMV baseia-se em uma equação que correlaciona a sensação térmica com as quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar) e dentre as variáveis referentes aos indivíduos, colocam-se (vestimenta e atividade metabólica), estimando o conforto térmico dos usuários por meio de dois parâmetros: o Voto Médio Estimado (PMV) e a Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD). Segundo a ASHRAE (2013) recomenda-se como aceitáveis, condições em que se obtenha até 20% das horas anuais em desconforto.

O PMV, calculado através de equação a seguir, apresentada Fanger, (1972):

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036 \cdot M) + (0,028)L] \quad (\text{Eq.1})$$

Onde o PMV= Voto médio previsto;

M = Metabolismo;

L = Termo de Acumulação de Energia

Já o indicador grau-hora, de acordo com Lamberts (2010), representa a quantidade de graus excedentes das faixas de temperaturas internas que, para o caso do verão, extrapolam a temperatura limite máxima pré-definida; ou quantos graus seriam necessários para que as temperaturas internas atingissem a temperatura limite mínima de conforto pré-definida, no caso do inverno. Ou seja, o somatório dos graus horários necessários para o resfriamento no caso do verão e para o aquecimento no caso do inverno.

Wallauer, (2010) afirma que o PMV é determinado por meio de uma correlação entre as taxas metabólicas dos ocupantes, de acordo com as atividades desempenhadas, e a carga térmica atuante no corpo dos mesmos, trazendo resultados instantâneos apenas. Enquanto que o indicador grau-hora nos

oferece uma análise anual das horas de desconforto caracterizando de forma mais contundente o desempenho térmico da edificação ao longo de ano.

2.1.2 Definição das Temperaturas De Conforto

A faixa de conforto é determinada por temperaturas limites, de máximo e de mínimo, que garantem o conforto e bem-estar dos indivíduos. Esta faixa é função de uma série parâmetros e é variável em função das características individuais dos ocupantes da edificação, conforme descrito nas sessões anteriores.

As definições das faixas de temperaturas podem ser definidas através da ISO 7730, em seu anexo A. Devem definidas as taxas de calor geradas pela ocupação da edificação, através das taxas metabólicas dos usuários, em MET ou W/m², de cada atividade desempenhadas pelos indivíduos em cada ambiente, a tabela com as atividades mais comuns pode ser obtida no anexo B, da mesma norma.

Em seguida deve-se definir o nível de vestimenta padrão para cada situação, inverno e verão. Conforme definido antes, o grau de vestimenta é definido em clo, e pode ser encontrado no Anexo C, da ISO 7730.

Por fim, a partir da classe da edificação, podendo varia de A à C, de acordo com a aceitabilidade do desconforto possível, são inseridos e analisados os dados da nos gráficos presentes no Anexo A, da mesma norma, onde obtêm-se as faixas de conforto em função da aceitabilidade do desconforto (PPD), as vestimentas e atividades desempenhadas. Chegando então a faixa de temperatura de conforto.

2.2 REGULAMENTAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

Ao dissertar sobre eficiência energética, faz-se necessário explicar os caminhos de sua regulamentação em edificações residenciais no Brasil. Tendo como ponto de partida a constituição da ELETROBRÁS, com a Lei 3890-A de 25 de abril de 1961, as normatizações a respeito da eficiência energética passaram a ser realidade. Segundo o Plano Nacional de Energia – PNE 2030 (BRASIL, 2007) a primeira ação organizacionalmente orientada foi a criação do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) em 1985. Tal ação tem como objetivo facilitar reflexão e mobilizar a população (bem como empreendedores e serviços) para o consumo racional e eficiente da energia elétrica, racionalizando o consumo e produção da mesma.

De acordo com Almeida (20014), seguindo o processo de formalização e sedimentação da perspectiva de economia energética, pôde-se tomar como referência ainda a parceria entre INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem) que criou a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Através desta, o consumidor pode avaliar os equipamentos a partir de uma escala variante de A (mais eficiente) a E (menos eficiente) – havendo ainda a variação até G para alguns casos especiais como por exemplo lâmpadas, partir dessa escala os

equipamentos são etiquetados com o chamado Selo PROCEL aqueles que obtiverem os melhores índices de eficiência energética dentro de sua categoria.

Cabe aqui ressaltar ainda aspectos relacionados A Lei de Eficiência Energética, Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001b), que foi aprovada a partir de decreto estabelecido no ano de 2001 – a Lei tramitava pelo Congresso Nacional desde 1990, após o país enfrentar um período de grave crise hídrica devido à falta de chuva que levou a considerável diminuição nos níveis dos rios que abastecem a rede de hidroelétricas responsável pela manutenção energética de grande parte do país. Tal Lei propõe a consideração de estabelecimento de níveis máximos de consumo (ou mínimos de eficiência energética) tanto para a fabricação de objetos produzidos no país, bem como para a construção.

Ainda de acordo com Almeida (2014) foi em 2003 que foi implantado através da parceria ELETROBRÁS/PROCEL o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, tendo como objetivo o incentivo da conservação dos recursos naturais e uso eficiente dos mesmos durante a construção de novas edificações, dessa maneira reduzindo os impactos sobre o meio ambiente. Segundo Moreira (2009), assim como já era estabelecido para os eletrodomésticos a etiquetagem das edificações viria a estimular que construtoras e incorporadoras aderissem aos conceitos de eficiência energética viabilizando assim a implementação e aplicação da Lei de Eficiência Energética.

Não seria sensato estabelecer padrões e normas idênticas para os diversos tipos de edificações, portanto, de acordo com Almeida (2014) existem variações na etiquetagem de edificações comerciais, serviços, obras públicas, bem como residenciais. Existem para orientar e fiscalizar as edificações os RTQ-C (Requisitos Técnicos de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos) e os RTQ-R (Requisitos para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) para ambos a etiqueta pode ser concedida tanto na fase inicial (de projeto da edificação) bem como na fase final (com a construção já concluída), salientando que a avaliação pode ser feita tanto por simulação quanto por método prescritivo.

Segundo Almeida (2014), quando considerados os edifícios comerciais, de serviços e públicos é avaliada a envoltória e os sistemas de iluminação e condicionamento de ar. Já para edificações residenciais é avaliada a envoltória e o sistema de aquecimento de água (além dos sistemas presentes nas áreas comuns dos edifícios multifamiliares).

Parece coerente pensar que ao ser estabelecida a obrigatoriedade da etiquetagem haverá uma considerável mudança no mercado. De acordo com Araújo (2009) esse será um forte aliado na mudança de mercado ao agregar valor àqueles empreendimentos que se dispuserem a se diferenciar dos mais convencionais através de uma classificação regulamentada por um órgão governamental.

Atualmente, vigoram no país duas normas que tratam do desempenho das edificações: a norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) e a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013). De acordo com Ferreira (2016) no Brasil a norma NBR 15.220 –

Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005), foi a primeira a ser criada e foi dividida em cinco partes. Desenvolvida com ênfase na avaliação de habitações unifamiliares de interesse social e apresentando recomendações de projeto baseado no zoneamento bioclimático nela proposto. Quando a questão se relaciona à envoltória, estabelece três tipos de paredes (leve, leve refletora e pesada) e três tipos de coberturas (leve isolada, leve refletora e pesada) que devem ser optadas de acordo com as condições climáticas. Para cada tipo de parede e cobertura há valores limites de transmitância térmica, atraso térmico e do fator solar previamente designados.

Em 2013 foi revista a norma NBR 15.575 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: desempenho, que fora publicada em 2008. De acordo com Ferreira (2016) nesta norma são considerados diversos aspectos do desempenho da construção, dentre eles o desempenho térmico.

“As normas de conforto térmico amplamente aceitas e utilizadas atualmente são a norma ISO 7730 (ISO, 2005) e a norma norte americana ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), sendo estas normas aplicadas na maioria das edificações residenciais e comerciais.” (FERREIRA, 2016, p.71) ambas norteiam a determinação da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas no índice PMV/PPD, dimensionados a partir das atividades desenvolvidas pelos indivíduos além de levar em consideração também as vestimentas por estes utilizadas. A ISO 7730 estabelece métodos para prognosticar a sensação térmica e o grau de conforto dos indivíduos em situações de ambientes térmicos moderados. De acordo com Ferreira (2016) o desconforto segundo a norma pode ser decorrente de fatores tais quais assimetria de temperatura radiante, correntes de ar, gradiente de temperatura vertical, temperatura dos pavimentos além do acréscimo da possibilidade de análise em longos períodos. Ainda são critérios de análise a velocidade do ar (1,5m/s é o limite estabelecido pela norma para esta variável) e a umidade relativa do ar (dentro dos limites de conforto, atualmente vem se utilizando a umidade variando entre 30 e 70%).

Considerando a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy é possível perceber que se assemelha à ISO 7730 (ISO, 2005) e detalha os critérios sejam ambientais ou individuais que serão responsáveis por predizer condições de conforto térmico tidas como satisfatórias a um percentual médio de 80% dos usuários de predefinida edificação. Segundo Ferreira (2016), a norma baseia a avaliação da sensação térmica no método PMV, e apresenta ainda diagramas para a análise de conforto térmico, tal norma considera ainda um segundo aspecto para avaliação do conforto térmico que se sustenta na noção de conforto adaptativo, sendo sua aplicabilidade eficaz em edifícios naturalmente ventilados durante o verão ou em climas quentes.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

Edificações são construídas pensando no benefício de quem irá utilizá-las, independentemente de que benefício seja este. Toda edificação é separada do ambiente que a circunda por uma envoltória que além de separá-la, protege e modifica o efeito direto das influências climáticas, dessa maneira, segundo Lamberts, Dutra, Pereira (2014) essas superfícies influenciam o comportamento térmico da edificação.

Segundo Ferreira (2016) os fatores que são responsáveis pela transferência de calor e de massa para as edificações são: radiação – funcionamento de trocas térmicas entre dois corpos a distância qualquer mas que são capazes de emitir e absorver energia térmica; a radiação é resultado na natureza eletromagnética da energia que por produzir efeitos térmicos em sua absorção não necessita de meio para sua propagação, evaporação – troca térmica proveniente da mudança de estado líquido para gasoso uma vez que para que haja a transformação faz-se necessário dispêndio energético, condensação de vapor de água – troca térmica decorrente da transformação de estado físico do gasoso para líquido, convecção - troca de calor entre corpos que precisam ser um sólido e outro em estado fluido (líquido ou gasoso), as trocas desse tipo são ativadas pela velocidade do ar quando em superfícies verticais e por fluxo do ar quando em superfícies horizontais, e condução – troca de calor entre dois corpos que se tocam ao menos em parte deles e que estejam na situação em temperaturas diferentes. As definições descritas estão de acordo com o Manual de Conforto Térmico de Frota (2001).

Dentre outras, segundo Ferreira (2016), as propriedades termo físicas dos materiais que interferem no fluxo de calor de uma edificação, e conseqüentemente, nas condições térmicas internas e de conforto dos ocupantes, são condutividade, resistência e transmitância térmica, massa específica, calor específico, absorvância, refletância, emissividade, coeficiente de convecção em relação às superfícies e transparência à diferentes comprimentos de onda de radiação solar (GIVONI, 1976).

De acordo com Ferreira (2016), conforme já citado anteriormente na presente dissertação, a avaliação de desempenho através do método simplificado visa a verificação de atendimento critérios pré-estabelecidos, ligados às características termo físicas dos materiais constituintes da envoltória, como transmitância e capacidade térmica. Ainda segundo a autora, alguns estudos apontam para inconsistências nas recomendações descritas nas normas, principalmente no que se refere aos valores limites estabelecidos para as características termo físicas das paredes e coberturas.

Já o método de medição só pode ser aplicado para construções já executadas, além de demandar uma série de coincidências climáticas para sua elaboração, não sendo o mais indicado para tomadas de decisões, mas sim para confirmações e calibrações de dados (LAMBERTS, 2014).

Pode-se dizer, após essa análise, que estudar o desempenho térmico de uma edificação é perceber e considerar a sua resposta às influências de ambiente externo e interno, colocando em questão aspectos minimamente pré-estabelecidos através de critérios que norteiam os estudos de comportamento térmico.

O que faz o método de avaliação de desempenho térmico através de simulações computacionais uma ferramenta com maior aplicabilidade, sendo possível reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto térmico das edificações ainda em suas fases de projeto. Desta forma, há, através de ferramentas como a simulação, um enorme potencial de utilização na busca por construções mais eficientes, contribuindo para que enfrentemos de forma racional as crises energéticas que se aproximam, conforme supracitado; garantido de forma comprovada a qualidade de vida dos ocupantes das mesmas.

2.4 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como forma de otimizar os cálculos referentes ao desempenho de edificações, ferramentas computacionais vêm sendo criadas e cada vez mais utilizadas por traduzir e simular a realidade dos fenômenos naturais, de forma a prever e contabilizar estes processos. De acordo com Lamberts (2010), existem softwares que podem avaliar edificações quanto a seu comportamento energético, térmico, acústico, de iluminação e entre outros. Lamberts (2010) afirma que o Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na internet uma lista com 347 programas de simulação de edificações, para análises de eficiência, energias renováveis e sustentabilidade para edificações.

Apesar desta infinidade de ferramentas e softwares, muitos têm funções específicas e restritas, sendo necessária a utilização de mais de um software para a elaboração das análises. Outros mais completos têm licenças pagas o que inviabiliza, por muitas vezes, o desenvolvimento acadêmico e a divulgação do tema. Entre eles destaca-se o Energyplus.

O Energyplus é software aberto, ou seja, de licença gratuita, desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos, segundo Carlo (2008) é um software capaz de simular o desempenho térmico e energético de edificações com todos os sistemas que a compõem sua operação, tais como climatização (propriedade que engloba resfriamento, aquecimento e ventilação natural e forçada), iluminação, cargas internas, propriedades térmicas de materiais, e outros elementos. De acordo com Duarte (2014), o Energyplus foi baseado nos programas BLAST e DOE-2, desenvolvidos no final da década de 1970 e começo de 1980.

Ainda, segundo Lamberts (2010), com o EnergyPlus, é possível realizar simulações para diferentes climas, conforme o interesse do usuário, a partir de um arquivo climático com dados climáticos, como temperaturas, umidade do ar entre outros, dispostos de forma horária ao longo do ano. Como resultado, obtêm-se resultados diversos, tais como temperaturas internas, temperaturas

superficiais, fluxo de calor pelos componentes do edifício, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc.

Algumas das características elencadas por Duarte (2014) posicionam o Energyplus dentre os principais programas de simulação destacam-se:

- Intervalos de tempo definidos pelo usuário para interação ente as zonas térmica e ambiente e intervalo de tempo variável para interação entre as zonas térmicas e os sistemas de climatização;
- Arquivo climático, arquivos de entrada e de saída em ASCII, incluindo condições ambientes horárias, sub-horárias e parâmetros de saídas múltiplas definidos pelo usuário;
- Técnicas de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas de edificação que permite calcular simultaneamente os efeitos de radiação e convecção nas superfícies internas e externas em cada intervalo de tempo;
- Condução de calor em regime transiente através dos elementos da edificação, utilizando as funções de transferência por condução;
- Modelagem avançada da transferência de calor pelo solo, utilizando modelos de diferenças finitas computacionais e técnicas analíticas simplificadas;
- Cálculos aprofundados para superfícies transparentes ou translúcidas, incluindo controle de cortinas, balanço de energia por camada dos vidros disponíveis comercialmente;
- Sistemas de condicionamento de ar configuráveis, permitindo ao usuário modelar sistemas típicos;
- Permite comunicação com outros programas de simulação, visando análise mais detalhas de alguns componentes da edificação.

Para as análises de climatização, Duarte (2014) afirma que o Energyplus é capaz de fornecer a capacidade de resfriamento disponível e a potência consumida pelo equipamento de condicionamento de ar, ser ajustadas às rotinas de utilização das condições de operação simuladas. O software utiliza as curvas de desempenho, fazendo correlações representadas por polinômios, onde seus coeficientes são os dados de entrada, obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo fabricante do equipamento.

2.4.1 Equações do Energyplus

Em seu trabalho, Souza (2010) ilustra quais são os algoritmos considerados no Energyplus para cálculo das trocas térmicas consideradas no programa. Inicialmente serão apresentadas as equações de fluxo de calor em função dos tipos de superfícies as quais o fenômeno acontece.

Para as superfícies opacas o software usa a função de transferência, uma série temporal da equação que relaciona o fluxo em uma superfície de um elemento para uma série infinita de resultados de temperatura em ambos os lados, em tempos regressivos. A forma básica da equação para condução é mostrada pela seguinte equação:

Para fluxo de calor interno:

$$q''_{ki}(t) = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (\text{Eq.2})$$

Para fluxo de calor externo:

$$q''_{ko}(t) = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (\text{Eq.3})$$

onde:

- T = temperatura, K
- i = interior da edificação
- o = exterior da edificação
- t = representa o tempo em cálculo
- X_j = coeficiente externo da função de transferência por condução, CTF, $j = 0, 1, \dots, nz.$
- Y_j = coeficiente cruzado da CTF, $j = 0, 1, \dots, nz.$
- Z_j = coeficiente interno da CTF, $j = 0, 1, \dots, nz.$
- Φ_j = coeficiente de fluxo da CTF, $j = 1, 2, \dots, nq$
- $q''_k(t)$ = fluxo de calor por condução (W/m^2)

O subscrito após a vírgula indica o período de tempo em termos de quantidade de passo de tempo.

Para as superfícies translúcidas o fluxo de calor é calculado de dependendo do tipo de radiação incidente, que pode ser direta, difusa ou refletida:

Radiação solar direta

$$I_{nd} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin\beta}\right)} \quad (\text{Eq.4})$$

onde:

I_{nd} = irradiação normal direta (W/m^2)

A = irradiação normal aparente na massa de ar $m=0$ (W/m^2)

B = coeficiente de extinção atmosférica

β = ângulo de incidência da radiação

Para a radiação solar difusa o EnergyPlus calcula da radiação solar difusa incidente do céu sobre uma superfície exterior leva em conta a distribuição de radiação anisotrópica do céu. Para esta distribuição, a radiação difusa do céu em uma superfície é dada por:

$$R_{sdf} = A_{SM} * I_{SD} \quad (\text{Eq.5})$$

onde:

R_{sdf} = radiação solar difusa do céu na Terra (W/m^2)

A_{SM} = multiplicador anisotrópico do céu. É determinado pela orientação da superfície e distribuição de radiação.

I_{SD} = irradiação solar difusa (W/m^2)

Para a radiação solar refletida os valores de reflectância do solo são utilizados para calcular o calor total refletido pelo solo. Esse montante fracionado é usado a seguir:

$$G_{RS} = (B_S * \text{Cos}(\theta) + D_S) * G_R \quad (\text{Eq.6})$$

onde:

G_{RS} = radiação solar refletida (W/m^2)

B_S = radiação solar direta (W/m^2)

θ = ângulo zenital do sol

D_S = radiação solar difusa (W/m^2)

G_R = refletância do solo

Desta forma, o ganho total solar em qualquer superfície exterior é uma combinação da radiação solar direta, difusa e refletida, sendo dada por:

$$Q_{SO} = I_b * \text{Cos}(\theta) * \frac{S_s}{S} + I_s * F_{SS} + I_g * F_{Sg} \quad (\text{Eq.7})$$

onde:

Q_{SO} = ganho total solar (W/m^2)

I_b = intensidade do feixe (direta) de radiação (W/m^2)

θ = ângulo de incidência dos raios do sol

S_s = área iluminada pelo sol, m^2

S = área da superfície, m²

I_s = intensidade da radiação difusa do céu (W/m²)

F_{SS} = fator de visão entre a superfície e o céu

I_g = intensidade da radiação difusa refletida pelo solo (W/m²)

F_{Sg} = fator de visão entre a superfície e o solo

Assim o fluxo de calor transmitido pelas janelas é dado, por:

$$Q_{tj} = T(\theta) * Q_{so} \quad (\text{Eq.8})$$

onde:

Q_{tj} = fluxo transmitido pelos vidros

T = transmitância dos vidros

Θ = ângulo de incidência dos raios do sol

Q_{so} = ganho total em calor

E a radiação solar interna absorvida pelas superfícies opacas, em ondas curtas, fração de calor absorvida na face interna de uma superfície opaca (piso, parede ou teto) é dada por:

$$Q_{rad.int(SN)} = QS_{ZN} * AbsIS_{SN} + AIS_{SN} * BS_{rad} \quad (\text{Eq.9})$$

onde:

Q_{rad.int(SN)} = radiação absorvida na face interna (W/m²)

ZN = número da zona

SN = número da superfície

QS_{ZN} = irradiação difusa na zona (W/m²)

AbsIS_{SN} = absortância solar da superfície interior

AIS_{SN} = fator de irradiação solar direta da superfície

BS_{rad} = irradiação solar direta externa (W/m²)

2.5 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

De acordo com Berto (2014) que define simulação como o uso de técnicas matemáticas e computacionais para simular o funcionamento de sistemas, o sistema em questão seria a eficiência energética de uma edificação e seu

conforto térmico, estes estão atrelados diretamente aos mecanismos de trocas térmicas que a mesma realiza com o ambiente.

Uma vez que o método da simulação torna possível a repetição de avaliações em situação controlada, fato que é indispensável quando se pensa em otimização do tempo de pesquisa, parece razoável utilizá-lo como ferramenta de estudo, sabendo que os sistemas de trocas térmicas englobam uma série de variáveis e parâmetros físicos, e para a análise dos quais faz-se necessário o isolamento destas a fim de verificar seu impacto frente a temática estudada.

Considerando que a temática abordada requer uma aplicabilidade prática, desenvolveu-se um estudo de caso, o qual é definido por Berto (2014) como descrição e análise aprofundada de um ou mais objetos de observação (casos), com o uso de múltiplos instrumentos de coleta de dados, podendo incluir a interação entre pesquisador e objeto de pesquisa. Sendo, neste caso, o alvo da análise o desempenho térmico das edificações e consumo energético; e os objetos de observações como sendo a influência dos parâmetros temo físicos e geométricos dos na análise em questão.

As simulações computacionais para o presente estudo de caso serão realizadas no software Energyplus, já mencionado no item 2.4. E, foram realizadas para uma edificação residencial protótipo, usado como modelo para todas as simulações aqui realizadas. A mesma será situada em Recife, cidade da região de clima quente e úmido do nordeste do Brasil, a fim de ser representativa para enriquecimento do conhecimento do tema para comunidade local.

A metodologia de avaliação de conforto térmico adotada foi o indicador grau-hora, que de acordo com Lamberts (2010), representa a quantidade de graus excedentes das temperaturas internas que extrapolam a temperatura limite máxima pré-definida; ou quantos graus seriam necessários para que as temperaturas internas atingissem a temperatura limite mínima de conforto pré-definida. Ou seja, o somatório dos graus horários necessários para o resfriamento no caso onde as temperaturas extrapolem as temperaturas limites máximas e para o aquecimento no caso no qual as temperaturas extrapolem as temperaturas limites mínimas.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A presente dissertação traz a comparação de simulações computacionais termo energéticas, realizadas para uma edificação simples, adotada como protótipo. Numa primeira fase, foram variados os materiais constituintes das vedações verticais da edificação, mantendo os mesmos materiais para as coberturas e pisos de cada zona térmica. Em uma segunda etapa, a mesma edificação foi simulada alterando apenas a orientação da locação da edificação. Em ambas as etapas o intuito foi demonstrar o impacto das escolhas, durante a etapa de projeto, no conforto térmico da edificação e no consumo de energia, e por consequência seu custo.

Outro ponto importante é a definição do tipo de metodologia de simulação a ser adotada. Existem dois tipos de simulações realizadas pelo software Energyplus: Simulações por dias típicos e Simulações por arquivos climáticos.

As simulações por dias típicos são aquelas em que se opta pela escolha de um dia com temperaturas comuns durante o inverno e o verão da região. E a opção através de arquivos climáticos utiliza um arquivo com uma série de dados coletados por vários anos, a fim de trazer médias das temperaturas horárias de cada dia do ano.

As normas relativas a conforto e desempenho térmico de edificações vigentes no país NBR 15.220 (ABNT, 2005) e NBR 15.575 (ABNT, 2013), apresentam incoerências entre os métodos propostos, segundo Ferreira (2016). Incoerências estas, que são provenientes de análises locais, pouco abrangentes, as quais não refletem as premissas de dimensionamento de desempenho das edificações de cada região. Onde é preciso que sejam conhecidas as condições ideais de desempenho térmico e de conforto, a priori, frente ao prosseguimento das normativas de eficiência energética. Além disso, estas mesmas normas também apontam para a utilização de dias típicos como a opção de simulação. O que segundo a autora não favorece a caracterização climática da região. Desta forma, no presente trabalho serão adotadas as simulações através dos arquivos climáticos anuais o que garantem dados mais coerentes mais próxima das condições reais.

Este tipo de simulação ainda permite a obtenção dos somatórios das temperaturas operativas e comparação com a faixa de temperatura de conforto, o indicador grau hora. Pela norma ASHRAE (2013) é aceitável que pelo menos 80% das horas anuais estejam dentro da faixa de conforto. Para a presente dissertação as faixas de conforto foram obtidas pela norma ISO7730 (2005) e foram definidas entre 26°C, como máxima, e 20°C, como mínima, para uma umidade de 50% considerada pela mesma norma. Entretanto, a mesma norma diz que o aumento norma revela que a variação de umidade relativa influencia modestamente na definição das temperaturas limites.

Com relação aos demais dados para definição das temperaturas limites de conforto: as taxas metabólicas foram definidas na Tabela 1, e fator vestimenta foi definido como pouco variável, em relação as médias de temperatura de inverno e verão da região em análise; sendo considerado como utilização de roupas leves, ao longo de todo o ano, 0,5 clo, conforme ISO7730 (2005).

Para o clima quente e úmido, segundo Araújo, (1996), os usuários são mais sensíveis a variações na ventilação natural do que a na própria variação da temperatura do ar. E Nicol, (2004) diz que, para este tipo de clima, esta ventilação pode ser responsável por uma redução equivalente de até 4C no ambiente. O mesmo autor ainda diz que, considerando o clima quente e úmido, as faixas de temperatura de conforto podem ser extrapoladas em até 2°C com o movimento do ar em climas tropicais.

Deve-se usar as temperaturas operativas para determinação do desempenho térmico das edificações, pois segundo Matos, (2007) esta considera a influência da temperatura média radiante. As temperaturas operativas podem ser obtidas diretamente como output do Energyplus.

É importante salientar, ainda, que a maioria dos parâmetros que serão apresentados nos tópicos seguintes, serão utilizados em todas as simulações da mesma forma. Sendo apenas modificados os que se referem às variáveis estudadas neste estudo de caso, que serão as propriedades termo físicas e a posição geométrica do modelo.

Entre os objetivos descritos no item 1.2 desta dissertação, está fazer com que este trabalho sirva para possibilitar o acesso de mais acadêmicos e profissionais à área da eficiência energética e das simulações computacionais para edificações, contribuindo com a comunidade acadêmica da região nordeste para a adoção deste tipo de metodologia. Portanto, a seguir, mostraremos cada item e variáveis considerados nas simulações realizadas, no caso de estudo.

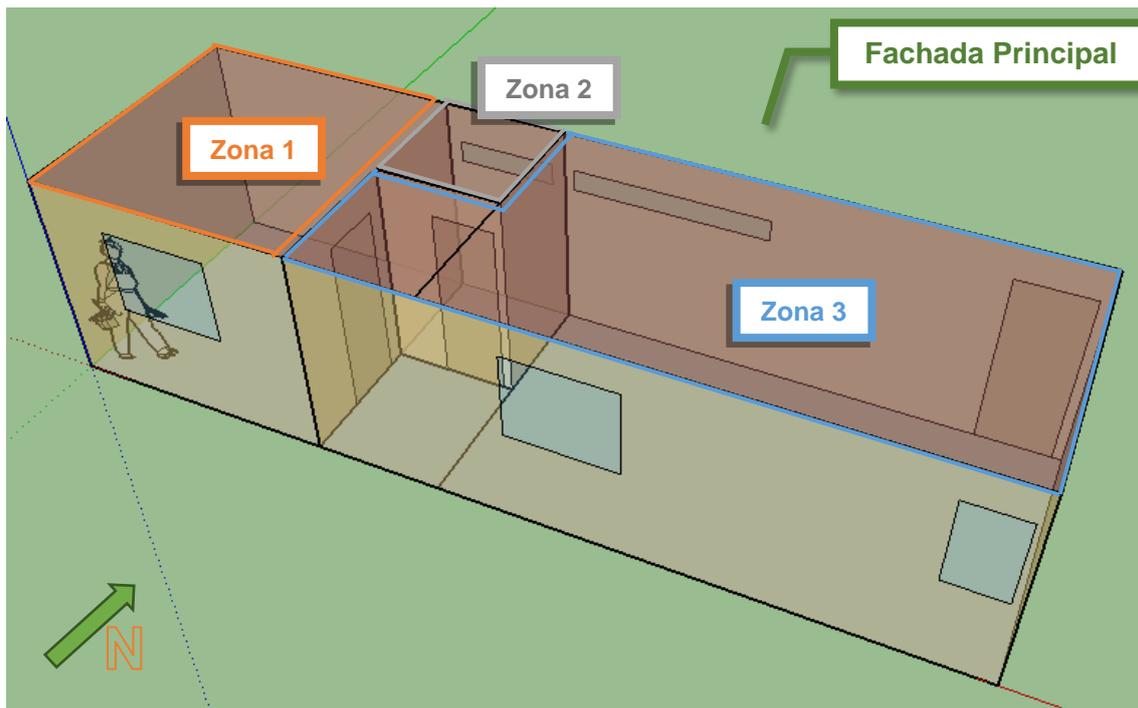
3.1.1 Geometria do Estudo

No presente estudo de caso foi adotada uma pequena edificação de aproximadamente 36 m². Optou-se por uma edificação mais simples com poucos cômodos, de modo que fossem reduzidas a quantidades de variáveis interagindo na mesma, e fosse possível evidenciar a troca materiais de constituintes nas vedações e sua mudança de orientação, que são o foco das simulações aqui realizadas.

Para realização das simulações a edificação foi dividida em três zonas térmicas (Figura 2). Zonas térmicas são aquelas onde as variáveis como temperatura interna, umidade, são consideradas constantes, como uma célula considerada para os cálculos; estas interagem entre si e com meio ambiente externo. Segundo (Souza, 2010) O Energyplus define como um volume de ar a uma temperatura uniforme, assim as zonas térmicas serão independentes. Assim cada cômodo da edificação deve ser definido como uma zona térmica.

No estudo a Zona 1, que é representada por um dormitório, a Zona 2, a qual é representada por um banheiro e a Zona 3, que representa uma sala, conforme Figura 2. Destas zonas, apenas a Zona 1 possui condicionamento de artificial de ar, sendo intercalado com ventilação natural, quando o sistema não está em funcionamento; as demais zonas possuem apenas ventilação natural regulada pela abertura das janelas e portas, conforme definida na rotina de utilização da edificação (input do programa). Estas rotinas de operação da edificação são detalhadas nos itens a seguir.

Figura 2. Identificação das Zonas Térmicas da Edificação Modelo



A modelagem geométrica da edificação foi elaborada, com sua fachada principal voltada para norte, conforme Figura 2, a partir do Google SketchUp, versão pro2016, atrelado à extensão Euclid, versão 0.9.3; que é uma extensão open-source que torna possível a modelagem do SketchUp ser compreendida pelo Energyplus, o qual foi utilizado a versão 8.7.

O SketchUp foi utilizado no presente trabalho com o intuito de facilitar a entrada de dados da geometria da edificação, pois o Energyplus requer as coordenadas de todas as vértices incluídos no modelo, sejam eles de paredes, pisos, tetos, janelas e até elementos de sombra. Desta forma com a utilização do plugin Euclid, todas as informações geradas no SketchUp são salvas em um arquivo com extensão .idf compreendida pelo Energyplus. Além disso, ele ainda identifica todos os elementos componentes de cada zona e quais destes fazer interseção com os elementos das zonas congruentes, o que agiliza de forma significativa, além de minimizar os erros, na entrada de dados no Energyplus. Na Figura 3, está ilustrada a entrada de dados importada do SketchUp.

Segundo (Lamberts, 2010) o Energyplus é capaz de estimar trocas térmicas a partir dos dados geométricos da edificação; considerando ainda as cargas

térmicas, ainda, dos sistemas de climatização de ar (aquecimento e resfriamento) e a ventilação natural. O software traz uma série de resultados entre eles os níveis de iluminação, temperaturas das superfícies, umidade do ar, temperaturas do ar interna das zonas e consumo energético de edifícios. Os dois últimos parâmetros citados os mais relevantes para a avaliação desta dissertação.

Figura 3 - Dados de entrada – Geometria

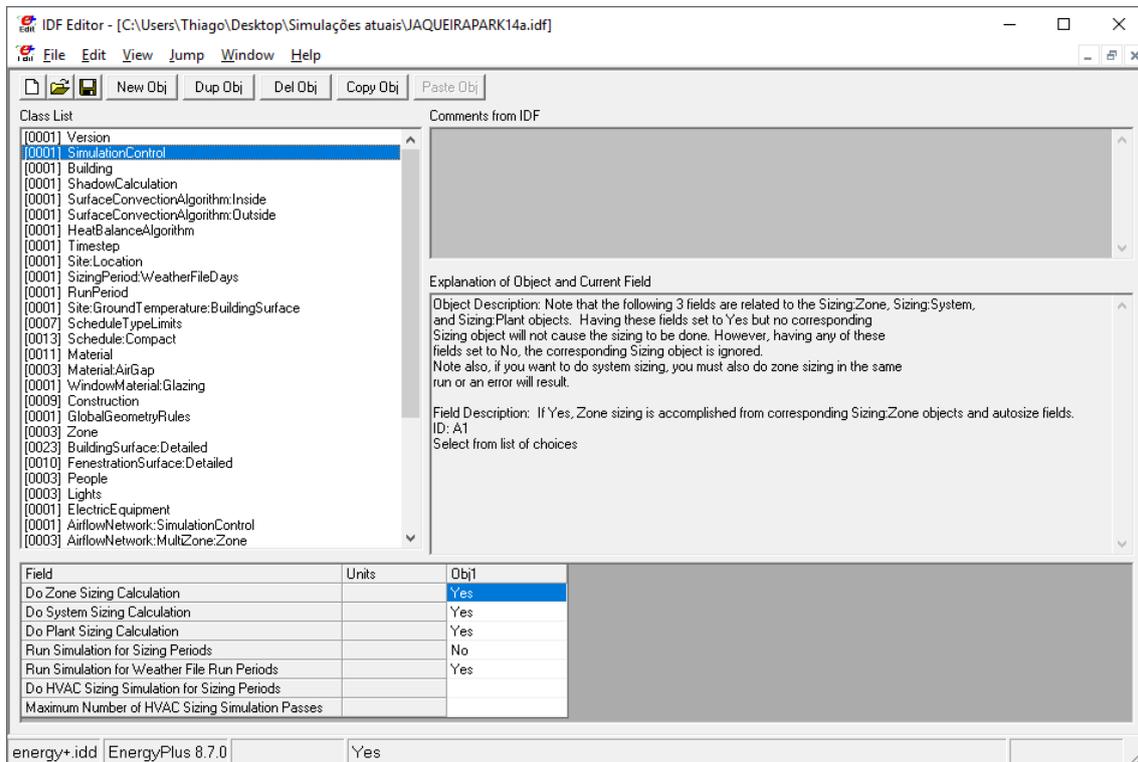
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12
Name		FIS021	PAR2Z1	PAR1Z1	PAR4Z1	PAR3Z1	TE1OZ1	FIS0Z2	PAR3Z2	TE1OZ2	PAR2Z2	PAR4Z2	PAR1Z1
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof	Floor	Wall	Roof	Wall	Wall	Wall
Construction Name		INTERIOR FLOOR	EXTERIOR WALL	EXTERIOR WALL	INTERIOR WALL	EXTERIOR WALL	EXTERIOR ROOF	INTERIOR FLOOR	INTERIOR WALL	EXTERIOR ROOF	EXTERIOR WALL	INTERIOR WALL	INTERIOR WALL
Zone Name		ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN02	ZN02	ZN02	ZN02	ZN02	ZN02
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Surface	Outdoors	Outdoors	Ground	Surface	Outdoors	Outdoors	Surface	Surface
Outside Boundary Condition Object					PAR1Z3				PAR3Z3			PAR3Z3	PAR3Z3
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	NoSun
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		0						0					
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	3	3	0	3	0	0	1.4	1.4	0	1.4	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	3	3	3	0	0	3	1.094308	-0.305692	1.094308	1.094308	-0.305692	1.094
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 2 X-coordinate	m	3	3	0	3	0	0	1.4	1.4	0	1.4	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	3	3	0	0	0	-0.305692	-0.305692	-0.305692	1.094308	-0.305692	1.094
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	2.5	0	0	2.5	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	0	0	0	3	3	3	0	1.4	1.4	0	1.4	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	3	0	1.6	0	0	-0.305692	1.094308	-0.305692	1.094308	-0.305692	-0.307
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	2.5	0	0	2.5	0	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	0	0	3	3	3	0	1.4	1.4	0	1.4	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	3	3	0	1.6	0	3	1.094308	1.094308	1.094308	1.094308	-0.305692	-0.307
Vertex 4 Z-coordinate	m	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 5 X-coordinate	m												
Vertex 6 X-coordinate	m												

3.1.2 Parâmetros de Simulação

Conforme mencionado anteriormente, a simulação realizada aqui será ao longo de todo ano, e não apenas nos dias típicos, utilizando os arquivos climáticos. Para a configuração deste tipo de simulação é necessária a habilitação de todos os campos dentro da classe *simulation control*, exceto o *run simulation for sizing periods*, conforme Figura 4.

Na etapa seguinte, na classe *Building* (ver Figura 5) apresenta os parâmetros externos que se relacionam com edificação. Por exemplo, caso haja alguma rotação da edificação em relação ao modelado no SketchUp, deve-se aplicar o ângulo desejado em graus com relação ao norte. No nosso caso a modelamos a edificação já na direção desejada; e quando buscou-se testar as posições da estrutura no terreno, modificamos também na modelagem que seria uma outra opção válida.

Figura 4 - Parâmetros de Simulação - Simulation Control



Em seguida, deve-se optar pelo tipo do terreno, na qual a edificação está locada, no nosso caso de estudo foi adotada cidade (*city*), visto que a edificação modelo está inserida em situação com muitos prédios em seu entorno. Este parâmetro refere-se à itens como velocidade do vento, por exemplo, que atuam de forma diferente dependendo dos obstáculos presentes (como outras edificações adjacentes, vegetações e etc.) em cada tipo de terreno. A distribuição solar deve ser selecionada com o tipo de distribuição desejada, no campo *solar distribution*. No nosso caso optou-se como completa interna e externa, considerando as reflexões; afim de termos uma maior aproximação da realidade. Os demais campos podem ser deixados com os valores recomendados pelo próprio software, estes necessitam de um conhecimento mais abrangente para implementá-los de forma diferente e segura.

Em seguida, deve-se fazer as escolhas dos parâmetros de sombreamento das edificações, na classe *shadow calculation*. Aqui todos os parâmetros adotados foram os recomendados pelo programa, Figura 6.

Para o nosso estudo de caso foram desconsiderados os elementos de sombra do entorno da edificação modelo, visto que estes seriam uma variável externa que sairia do foco dos objetivos específicos da análise, principalmente no que se refere à orientação da edificação no terreno. Entretanto, em uma simulação para um projeto real a avaliação destes elementos é de fundamental importância na avaliação do desempenho térmico das edificações.

Figura 5 - Parâmetros de Simulação – Building

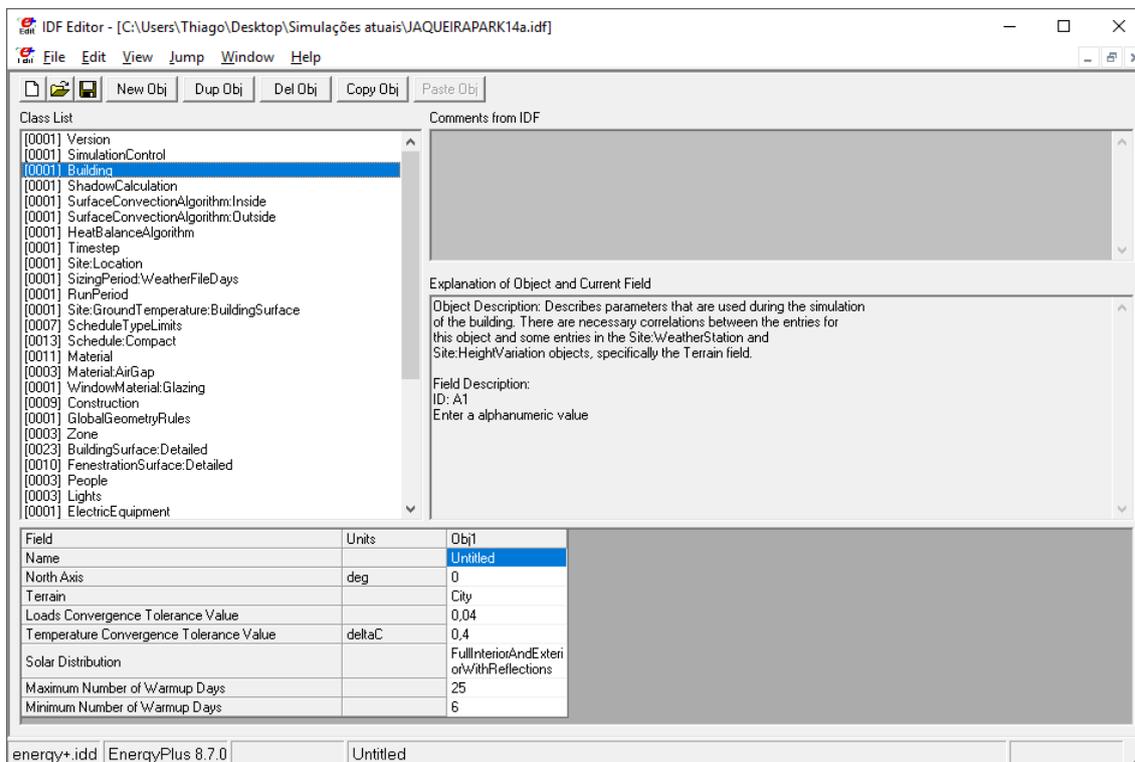
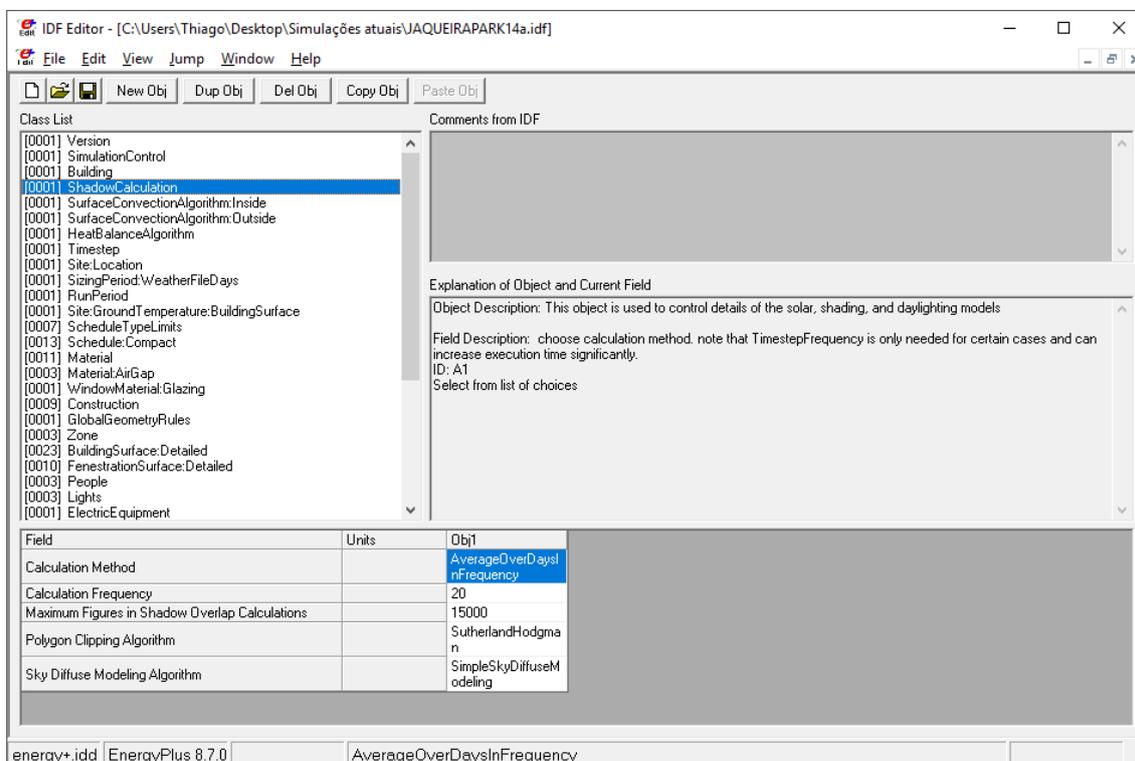


Figura 6 - Parâmetros de Simulação – ShadowCalculation



Para os algoritmos de convecção foram selecionados os modelos TARP, para as convecções internas e DOE-2 para as convecções externas a estrutura, nas

classes *Surface Convection Algorithm: Inside* e *Surface Convection Algorithm: Outside*, respectivamente. Bem como, para os algoritmos de balanço de calor, na classe *Heat Balance Algorithm*.

Na classe *Time Step* deve-se selecionar a quantidade de frações de hora devem ser feitas os resultados dos para modelo de balanço de aquecimento das zonas, no caso utilizamos o recomendado de seis vezes, o que representa um cálculo a cada dez minutos.

3.1.3 Arquivos Climáticos

Para a estimativas das trocas térmicas o Energyplus requer um arquivo climático com uma longa série de dados climatológicos que servem como condição do contorno do software. Para todas as simulações realizadas no presente estudo o arquivo climático, adotado foi o de Recife (BRA_Recife.828990_IWEC) obtido diretamente no diretório do Energyplus.

Recife é uma cidade do Nordeste Brasil, cujo o clima é denominado quente e úmido, clima que possui uma baixa amplitude térmica anual com temperaturas médias em torno de 25,5°C e alta pluviosidade com índice pluviométrico anual acima de 2000mm.

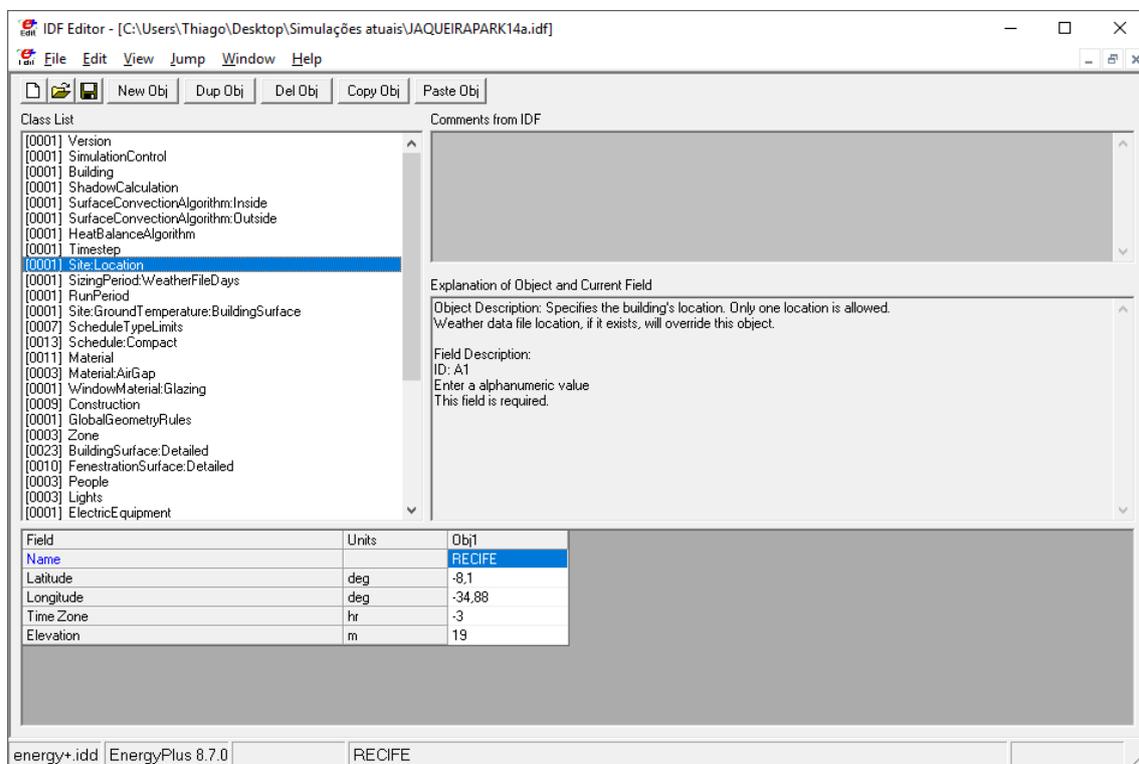
O clima desta região conta temperaturas altas durante todo o ano mesmo durante o inverno, requerendo ações completamente diferentes das tomadas para climas subtropicais e temperados, por exemplo, das demais localidades do país; os quais apresentam grandes amplitudes térmicas.

Pretende-se desta forma, enriquecer o acervo de informações sobre estudos de conforto térmico e eficiência energética para a região.

Como dados de entrada no software deve-se incluir os dados referentes aos arquivos climáticos, como latitude e longitude, o fuso horário do local e sua altitude, conforme

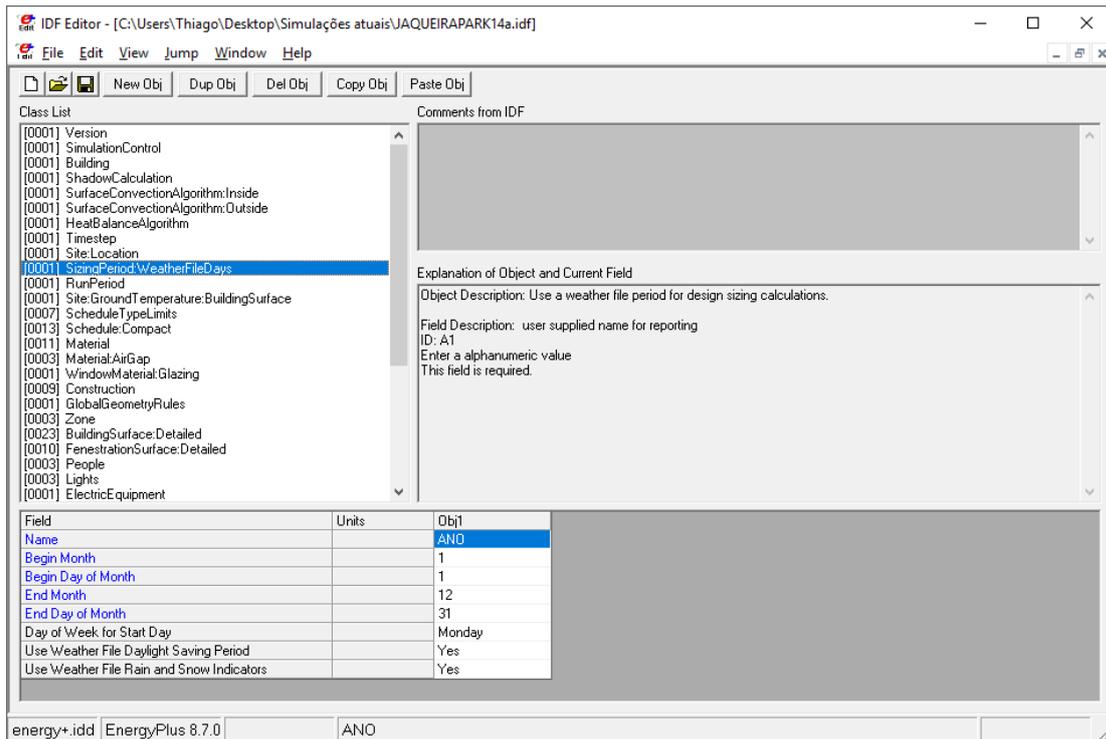
Figura 7. Estas informações podem ser obtidas diretamente do arquivo climático, nos arquivos com extensão .stat que são baixados juntamente com os arquivos climáticos de extensão .epw.

Figura 7 - Arquivos Climáticos - Site Location



Para definição do tempo de simulação deve-se selecionar a na classe *Sizing Period Weather File days* as datas de início e término da simulação, os dias considerados como início da semana e se a simulação utilizará as informações do arquivo climático para os cálculos. Para o estudo aqui desenvolvido, as simulações são anuais e fazem uso do arquivo climático, ver Figura 8.

Figura 8 - Arquivos Climáticos - Sizing Period

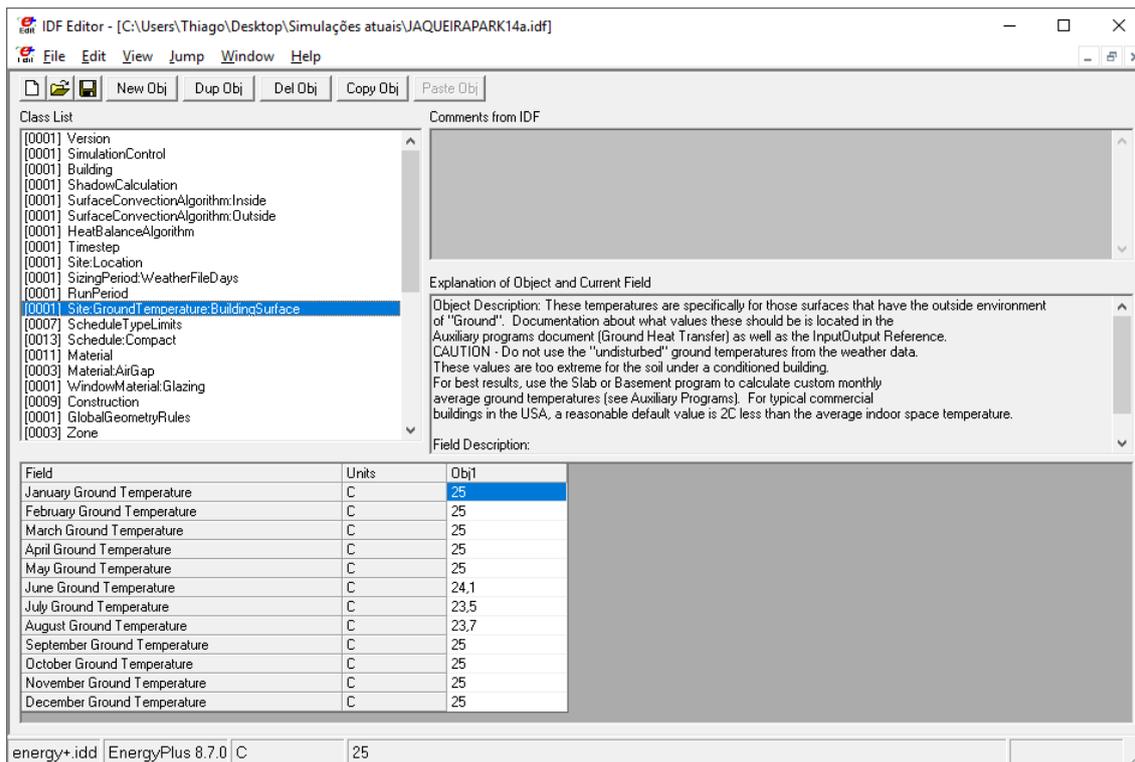


Em seguida, deve-se definir as temperaturas de absorvidas pelo terreno na classe *Site Ground Temperature: Building Surface* estas devem ser definidas utilizando a seguinte equação:

$$T_{solo} = T_{bulbo\ seco} - 2\text{ }^{\circ}\text{C} \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Onde as temperaturas de bulbo seco podem ser obtidas a partir das médias das temperaturas diárias encontradas no arquivo climático com extensão .stat, para o caso em estudo os dados utilizados foram os observados na Figura 9.

Figura 9 - Arquivo Climático - Site Ground Temperature



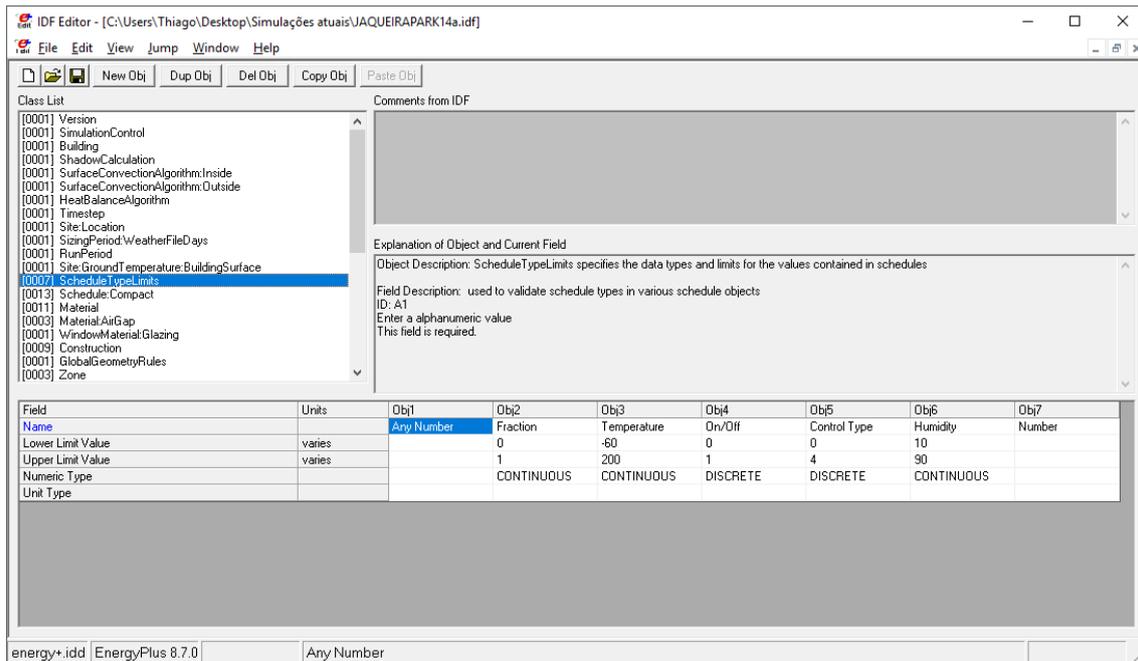
3.1.4 Parâmetros de Cargas Internas e Utilização da Edificação

Os parâmetros aqui apresentados, definem as cargas térmicas internas da edificação, estas realizam trocas com as cargas térmicas provenientes do exterior através de algoritmos implementados nos softwares de simulação. De acordo com a (ABNT, 2013) as cargas térmicas podem ter origem tanto no funcionamento de equipamentos e lâmpadas quanto na atividade metabólica das pessoas que ocupam as estruturas.

Para a quantificação destes dados faz-se necessário o registro potência instalada dos equipamentos da edificação e os horários em que os mesmos são utilizados, cômodo a cômodo, caso a edificação seja existente, ou os equipamentos projetados, caso estejamos fazendo a simulação em fase preliminar. De forma análoga, para a iluminação zona a zona, registrando sua potência o e rotinas de utilização. E, por fim, a taxa de ocupação pretendida para cada área de casa.

Inicialmente, para entrada dos dados das cargas térmicas no utilizadas nas simulações, faz necessária a inclusão dos tipos de parâmetros que poderão ser incluídos na simulação, na classe *Schedule Type Limits*; bem como os limites de cada categoria que se deseja incluir análise (ver Figura 10).

Figura 10 - Cargas internas - Schedule Type Limits



As cargas internas devido à ocupação, são obtidas a partir, primeiramente, da quantidade de pessoas ocupantes a zona térmica, em segundo lugar, pela da atividade desempenhada pelas pessoas na mesma. Alguns dos valores referentes às taxas metabólicas de algumas atividades comuns são apresentadas, em W/m^2 , no anexo B da norma (ISO 7730, 2005). Para o presente estudo caso foram adotadas atividades entre atividades leves ($58 W/m^2$). Segundo, (Wallauer, 2003) pode-se considerar, a partir da forma de DuBois, a área corporal de um indivíduo médio de 70 kg, igual a $1,8m^2$, que aplicada a nossa taxa metabólica do projeto chegamos ao valor de 105 W.

Na tabela a seguir ilustramos a as cargas térmicas e de iluminação de cada zona térmica:

Tabela 1 - Cargas Internas - Atividade dos Usuários

Ativ. De pessoas	Zona	Atividade Realizada	Calor Produzido (w/m^2)	Calor produzido para área de pele = $1,80 m^2$ (W)
	Zona 1 - Dormitório	Sentado, relaxado	58	104,4
	Zona 2 - Banheiro	Em pé	70	126
	Zona 3 - Sala/cozinha	Sentado, relaxado	58	104,4

As cargas internas devido à atividade dos ocupantes são valores individuais e sendo necessária a configuração da quantidade de pessoas e ocupando o ambiente e ainda o tempo que de permanência dos mesmos nas zonas térmicas. Estes itens são configurações são inseridas no Energyplus nas rotinas de utilização, os *schedules*. Optou-se pela utilização do *schedule compact*, que é uma simplificação desta entrada de dados, ilustrada na Figura 11.

Aqui, os objetos criados “ATIV.PESSOASZ1_Z3” e “ATIV.PESSOASZ2” representam o valor do calor produzido pelos ocupantes em cada uma das zonas, sendo os valores iguais para as zonas 1 e 3, que pela rotina prevista neste estudo de caso, comportam até duas pessoas, a quantidade de pessoas no ambiente será incluída mais à frente na classe *people*. Já os objetos inseridos

como “PESSOASZ1”, “PESSOASZ2” e “PESSOASZ3”, na mesma classe, representam o tempo que os usuários permanecem ao longo do dia em cada cômodo, caracterizando de forma correta a ocupação.

Figura 11 - Cargas Internas - Schedule Compact

Field	Units	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11
Name		ATV	LAMPADAS_Z1Z2	PESSOASZ2	PESSOASZ1	PESSOASZ3	LAMPADAS_Z3	ATV_PESSOASZ3_POINT	VENTILACAO_SET	VENTILACAO_TURAL
Schedule Type Limits Name		Any Number	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Any Number	Temperature	Fraction
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31						
Field 2	varies	For: AllDays	For: Weekdays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays				
Field 3	varies	Unit: 24.00	Unit: 17.00	Unit: 07.00	Unit: 07.00	Unit: 14.00	Unit: 17.00	Unit: 24.00	Unit: 24.00	Unit: 09.00
Field 4	varies	104	0	0	1	0	0	126	23	0
Field 5	varies		Unit: 19.00	Unit: 08.00	Unit: 20.00	Unit: 18.00	Unit: 22.00			Unit: 20.00
Field 6	varies		.5	.5	0	.25	1			1
Field 7	varies		Unit: 22.00	Unit: 19.00	Unit: 21.00	Unit: 19.00	Unit: 24.00			Unit: 24.00
Field 8	varies		1	0	.5	1	0			0
Field 9	varies		Unit: 24.00	Unit: 20.00	Unit: 24.00	Unit: 21.00	For: Weekends			AllOtherDays
Field 10	varies		0	.5	1	.5	Unit: 17.00			
Field 11	varies		Unit: 24.00	Unit: 24.00	For: Weekends	Unit: 24.00	0			
Field 12	varies		0	0	Unit: 09.00	0	Unit: 22.00			

De forma similar funciona para a iluminação para os equipamentos. Para a iluminação são inseridas as rotinas de acionamento da mesma, e o percentual de utilização do total da iluminação instalada em cada ambiente. Na presente dissertação estão representadas pelos objetos “LAMPADAS_Z1Z2” e “LAMPADASZ3”, na Figura 11. As potências da iluminação são inseridas na classe *lights*.

Para os equipamentos deve-se inserir um a um, com as rotinas de utilização descritas no *schedule compact* e as potências inseridas na classe *electric equipment*, que será mostrada mais a diante. Para este estudo de caso as rotinas dos equipamentos foram inseridas no seguinte através dos objetos “TV”, “CHUVEIRO” e “VENTILADOR”, ver Figura 12. As cargas dos equipamentos adotados para o estudo podem ser observadas na Tabela 2. A tabela ainda contém ainda os locais onde essas as cargas são aplicadas.

Tabela 2 - Cargas Internas – Equipamentos

Aparelho	Pot. Média (W)	mins/dia	horas/dia	Utilização no mês (dias)	Consumo Médio Mensal (kWh)	Zonas
Chuveiro Elétrico	3500	40	0,67	30	70	Zona 2
TV	85	90	1,50	30	3,825	Zona 3
Ventilador	65	40	0,67	30	1,3	Zona 3

Ainda na classe *schedule compact*, deve-se incluir as rotinas de ventilação e condicionamento de ar, considerando os horários que estes sistemas serão acionados. Os mesmos foram inseridos nos objetos: “VENTILACAO_NATURAL” e “AR_COND”, ”, ver Figura 12.

Além disso, deve-se definir as temperaturas a partir da qual as janelas serão abertas para permitir a ventilação natural, sendo um segundo condicionante além da rotina definida anteriormente. No presente estudo foi utilizada a temperatura de 25°C, como condicionante para abertura das janelas. Esta informação foi inserida através do objeto “VENTILACAO_SETPOINT”.

Figura 12 - Cargas Internas - Schedule Compact 2

energy+.idd | EnergyPlus 8.7.0

Field	Units	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15
Name		PESSOAS23	LAMPADAS_23	ATIV_PESSOAS22	VENTILACAO_SETPOINT	VENTILACAO_NATURAL	AP_COND	TV	CHUVEIRO_ELETRICO	VENTILADOR
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Any Number	Temperature	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: Weekdays	For: Weekdays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Unit: 14.00	Unit: 17.00	Unit: 24.00	Unit: 24.00	Unit: 07.00	Unit: 07.00	Unit: 20.00	Unit: 07.00	Unit: 20.00
Field 4	varies	0	0	126	25	0	1	0	0	0
Field 5	varies	Unit: 18.00	Unit: 22.00			Unit: 22.00	Unit: 22.00	Unit: 21.30	Unit: 07.20	Unit: 20.40
Field 6	varies	.25	1			1	0	1	1	1
Field 7	varies	Unit: 19.00	Unit: 24.00			Unit: 24.00	Unit: 24.00	Unit: 24.00	Unit: 19.00	Unit: 24.00
Field 8	varies	1	0			0	1	0	0	0
Field 9	varies	Unit: 21.00	For: Weekends AllOtherDays						Unit: 19.20	
Field 10	varies	5	Unit: 17.00						1	
Field 11	varies	Unit: 24.00	0						Unit: 24.00	
Field 12	varies	0	Unit: 22.00						0	
Field 13	varies	For: Weekends AllOtherDays	1							
Field 14	varies	Unit: 10.00	Unit: 24.00							
Field 15	varies	n	n							

Vale-se salientar que o intuito do presente estudo é avaliar interferência do tipo de material de vedação adotado e sua orientação no terreno, portanto as cargas internas e rotinas de utilização foram mantidas constantes ao longo das simulações.

3.1.5 Parâmetros de Entrada das Características Termofísicas das Envoltórias

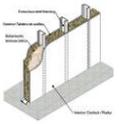
Para o presente estudo de caso, este item é o mais relevante para a primeira etapa da avaliação descrita nos objetivos do trabalho. Conforme já mencionado anteriormente, todas as simulações foram realizadas para a mesma edificação, na qual divergiram no apenas no material de vedação adotado, permitindo-nos, desta forma, avaliarmos o impacto desta variável no projeto como um todo.

Nesta seção serão apresentadas as propriedades termo físicas adotadas nos materiais de vedação avaliados. Entre algumas das premissas adotadas foram as seguintes: variação material de vedação em todas as paredes, internas e externas simultaneamente; para ambas as zonas térmicas foram mantidas uma laje de concreto, com espessura de 20cm, como laje de piso e de teto para todas as simulações; as paredes foram consideradas como camadas de “sanduíches”, com as espessuras e propriedades descritas na Tabela 3 (não foram consideradas propriedades equivalentes, conforme descrito na NBR15220, pois a mesma não explica como calcular o equivalente da maioria dos parâmetros requeridos pelo Energyplus).

Foram utilizados diversos tipos composições de vedações para as paredes, como pode ser visto na Tabela 3. Estes materiais foram adotados por representarem os principais tipos de vedações utilizadas na construção civil brasileira, desde os mais tradicionais como: os blocos cerâmicos e de concreto; até as vedações com placas cimentícias, painéis pré-moldados de concreto e até paredes metálicas representando as construções constituídas com contêineres marítimos.

Nesta tabela, podem ser vistas as propriedades termo físicas adotadas com inputs do software de simulação, como: condutividade térmica, densidade, calor específico e absorvância; bem como as espessuras adotadas para a cada elemento empregado.

Tabela 3 - Características Termo Físicas

Tipos de Vedação		Composição das camadas da Parede	Cond. Térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor Específ. [J/kg.K]	Abs. Térmica	Abs. Solar	Abs. Visível	Espessura da camada (m)	
	Alvenaria de blocos de concreto estruturais	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Bloco de concreto (14x19x39cm)	1,75	2400	1005	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Camada de ar (9cm)	Resistencia térmica = 0,17 m².K/W							0,09
		Bloco de concreto (14x19x39cm)	1,75	2400	1005	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Alvenaria de blocos cerâmicos estruturais	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,008	
		Camada de ar (2cm)	Resistencia térmica = 0,14 m².K/W							0,02
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,007	
		Camada de ar (7cm)	Resistencia térmica = 0,17 m².K/W							0,07
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,007	
		Camada de ar (2cm)	Resistencia térmica = 0,14 m².K/W							0,02
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,008	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Alvenaria de blocos cerâmicos maciços	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Bloco cerâmico (19x9x5,7)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,09	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Painéis de Concreto Pré-moldados	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Painél de concreto (15cm)	1,75	2400	1005	0,9	0,7	0,7	0,15	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Alvenaria de blocos cerâmicos convencionais de oito furos	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,008	
		Camada de ar (3cm)	Resistencia térmica = 0,16 m².K/W							0,02
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,007	
		Camada de ar (3cm)	Resistencia térmica = 0,16 m².K/W							0,02
		Bloco cerâmico (14x9x39)	0,9	1600	920	0,7	0,7	0,7	0,008	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Paredes em Steel Frame com placas cimentícias impermeabilizadas	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Placa cimentícia (1,2cm)	0,95	2200	840	0,9	0,7	0,7	0,012	
		Camada de ar (9cm)	Resistencia térmica = 0,17 m².K/W							0,09
		Placa cimentícia (1,2cm)	0,95	2200	840	0,9	0,7	0,7	0,012	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Paredes em Steel Frame com placas cimentícias impermeabilizadas + Lã de Rocha	Argamassa externa (2,5 cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
		Placa cimentícia (1,2cm)	0,95	2200	840	0,9	0,7	0,7	0,012	
		Lã de rocha	0,045	100	750	0,4	0,4	0,4	0,04	
		Camada de ar (5cm)	Resistencia térmica = 0,16 m².K/W							0,09
		Placa cimentícia (1,2cm)	0,95	2200	840	0,9	0,7	0,7	0,012	
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	1800	1000	0,9	0,7	0,7	0,025	
	Construção em container Marítimo	Aço corten	55	7800	460	0,2	0,2	0,2	0,0013	
		Lâmina de Alumínio	230	2700	880	0,05	0,05	0,05	0,0002	
		Lã de rocha	0,045	100	750	0,4	0,4	0,4	0,04	
		Gesso acartonado	0,35	900	840	0,27	0,3	0,3	0,0125	

Estes valores foram retirados em grande parte da norma (NBR 15220, 2003), e

outras partes da de autores, como (Frota, 2001) ente outros, que complementaram as informações. Foram, ainda, utilizadas as normas NBR 15270 e NBR 16475 para definição das geometrias dos blocos utilizados.

A entrada de dados das propriedades termo físicas dos materiais no Energyplus são inseridas na classe *material*, onde devem ser incluídas as propriedades de cada material componente da parede, como: rugosidade, espessura, condutividade térmica, densidade, calor específico e absortância, ver Figura 13. Estas propriedades serão combinadas na classe *construction*, mais a diante, montando as propriedades da parede.

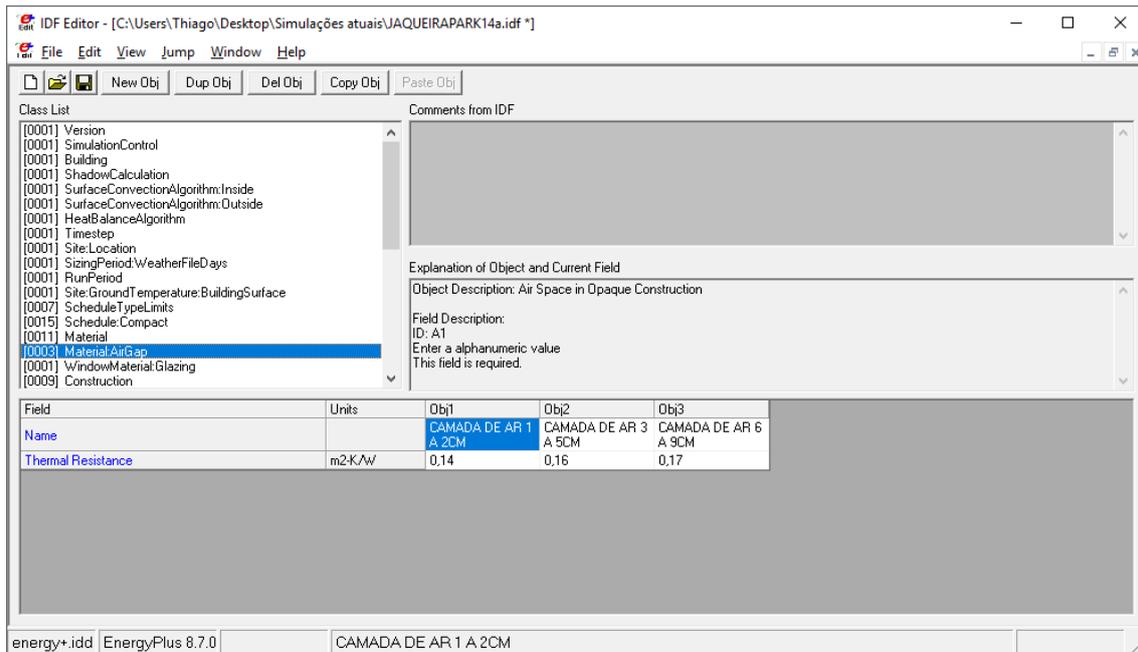
É importante salientar que caso os hajam o mesmo material, mas que seja empregado com espessuras diferentes nas diversas paredes incluídas, estes terão que ser diferenciados pela sua espessura entrando em objetos diferentes. Como por exemplo o concreto que é empregado nos blocos de concreto com espessura de parede de 2,5cm e nos painéis de concreto que tem espessura de 10 cm.

Figura 13 - Propriedades Termo Físicas – Materiais

Field	Units	Ob1	Ob2	Ob3	Ob4	Ob5	Ob6	Ob7	Ob8	Ob9	Ob10
Name		CONCRETO 2.5CM	CERAMICA 0.8CM	CONCRETO 20CM	ARGAMASSA CONJUM 2.5CM	MADEIRA	GESO ACART. 1.25CM	LA DE ROCHA 4CM	CONCRETO 15CM	CERAMICA 0.7CM	CEF
Roughness		Rough	MediumRough	Rough	Rough	MediumRough	MediumRough	Rough	Rough	MediumRough	Med
Thickness	m	0.025	0.008	0.2	0.025	0.03	0.0125	0.04	0.15	0.007	0.05
Conductivity	W/m-K	1.75	0.3	1.75	1.15	0.29	0.35	0.045	1.75	0.9	0.9
Density	kg/m3	2400	1600	2400	1800	900	900	100	2400	1600	1600
Specific Heat	J/kg-K	1000	920	1005	1000	1340	840	750	1000	920	920
Thermal Absorptance		0.9	0.7	0.9	0.9	0.9	0.27	0.4	0.9	0.7	0.7
Solar Absorptance		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7
Visible Absorptance		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7

Os valores das resistências térmicas das camadas de ar presente entre os blocos de vedação são obtidos a partir das tabelas do anexo B, onde são função da espessura da camada de ar e da emissividade do material. Estes valores são incluídos na classe *Material: Air Gap*, conforme Figura 14, e posteriormente incluídos na classe *construction* na composição da parede.

Figura 14 - Propriedades Termo Físicas - Resistência das Camadas de Ar



Um terceiro parâmetro que deve ser definido com relação aos materiais adotados são as propriedades dos vidros das janelas. No Energyplus esses parâmetros são incluídos na classe window material glazing. Aqui, no presente trabalho, foram utilizados os valores ilustrados na Figura 15.

Durante a modelagem realizado no software SketchUp, com auxílio do plugin Euclid, são definidos os nomes de cada umas das *surfaces* que surgem no modelo, suas interseções e que de tipo elas são, podendo ser paredes externas ou internas, pisos internos ou externos, telhados, forros. As diferenciações entres os tipos externos e internos, são devido à exposição ou não radiação solar e ação do vento.

Após a modelagem cada uma das *surfaces*, com o modelo importado para o Energyplus serão definidas as composições das propriedades de cada camada da parede na classe *contruction*, atribuindo pondo-as ordenadas a partir da parede exterior, ver Figura 16.

Figura 15 - Propriedades Termo Físicas - Window Material Glazing

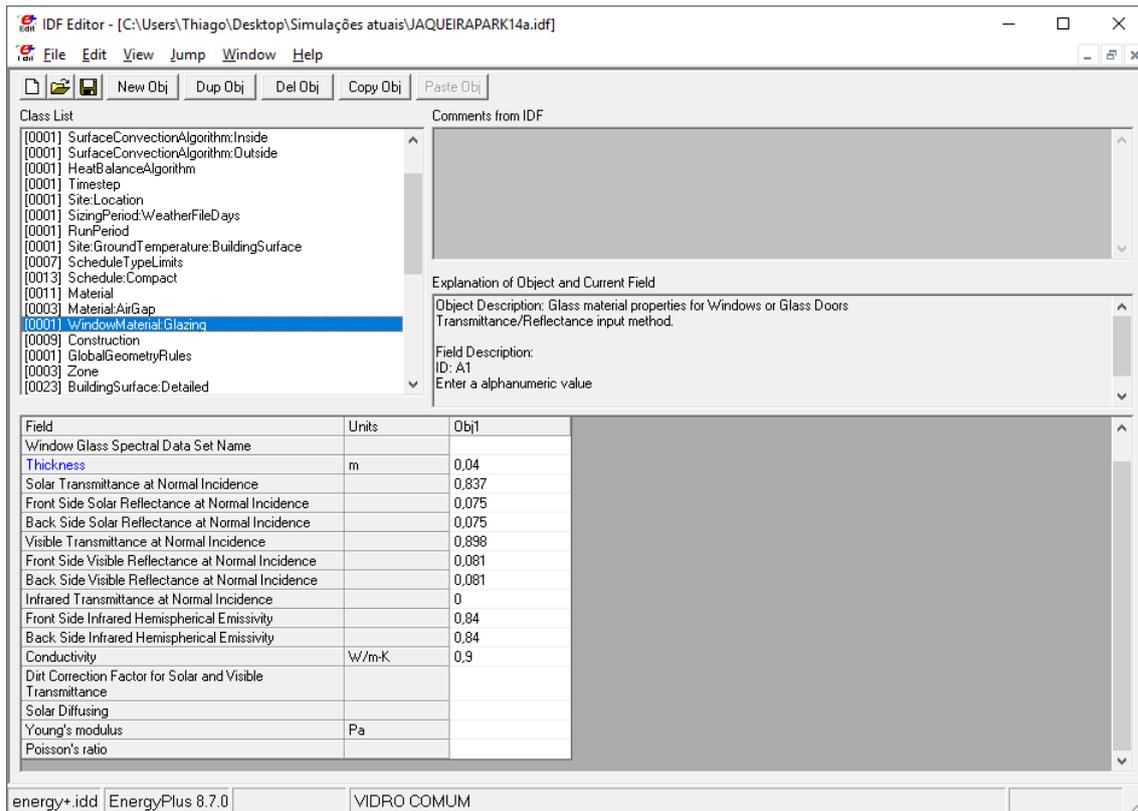
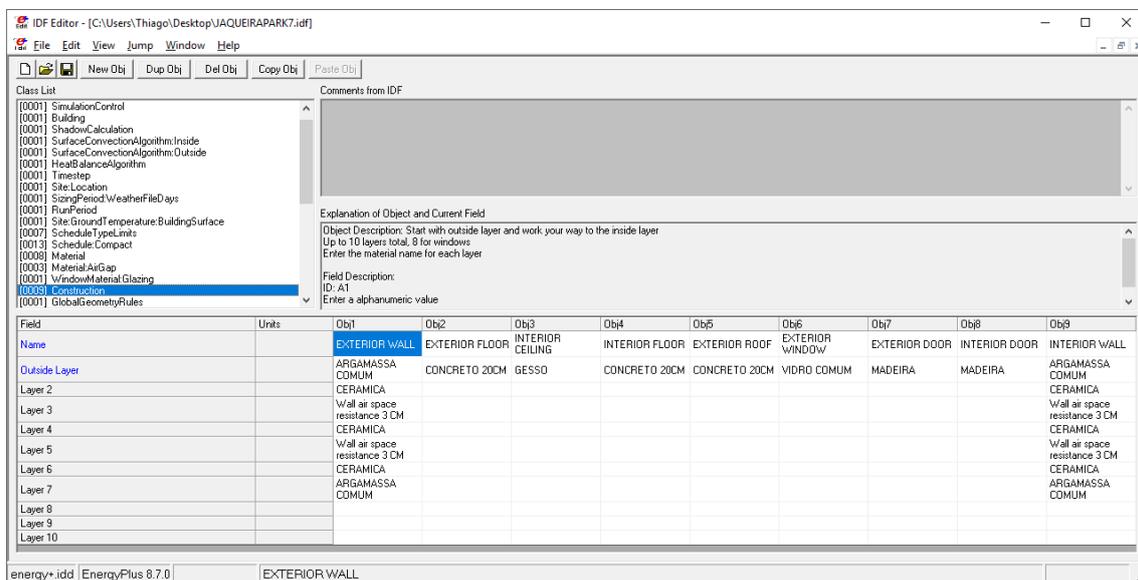
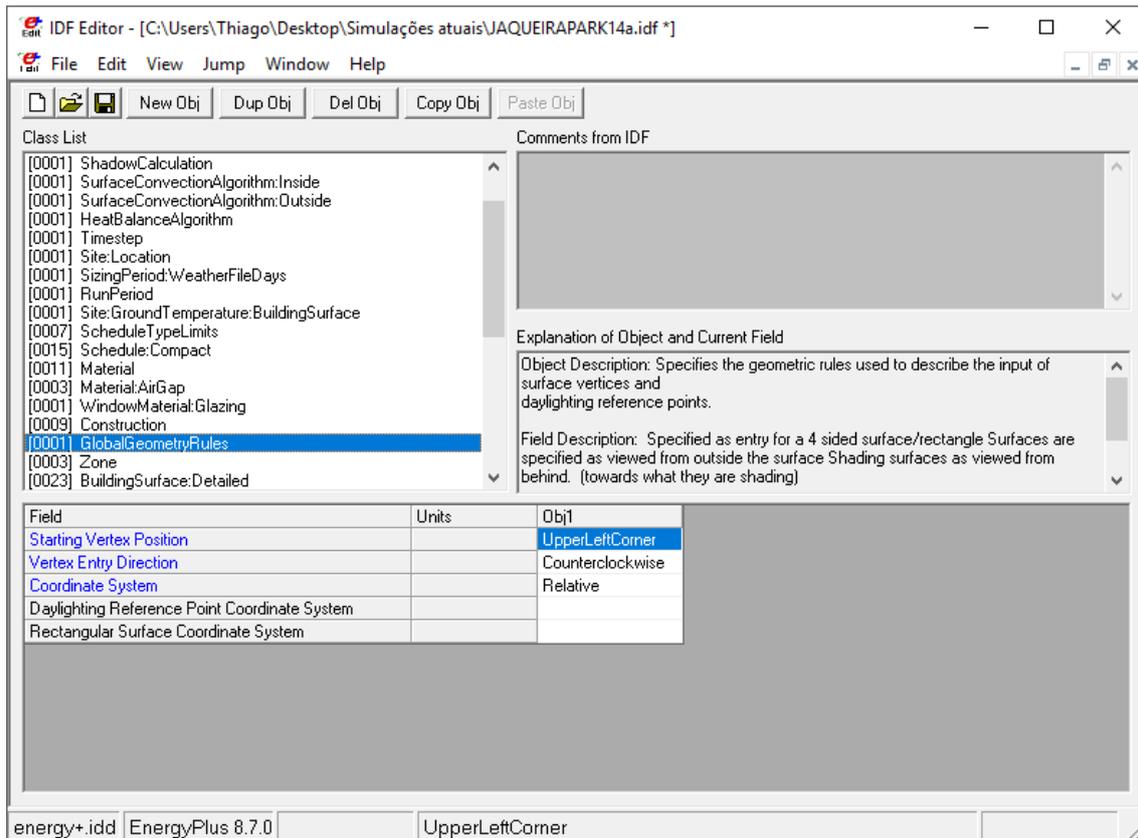


Figura 16 - Propriedades Termo Físicas – Construction



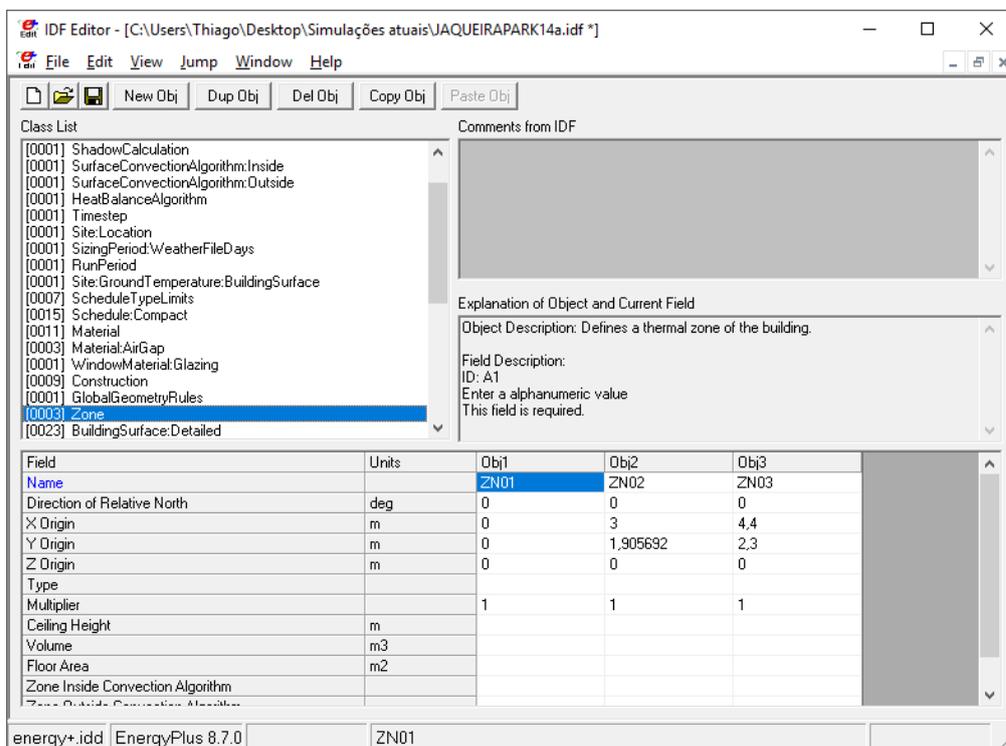
Na classe *Global Geometry Rules*, são definidas as regras entendimento por parte do programa, como a orientação da leitura das coordenadas e direção da entrada de dados dos vértices, ver Figura 17.

Figura 17 - Propriedades Termo Físicas - Geometry Rules



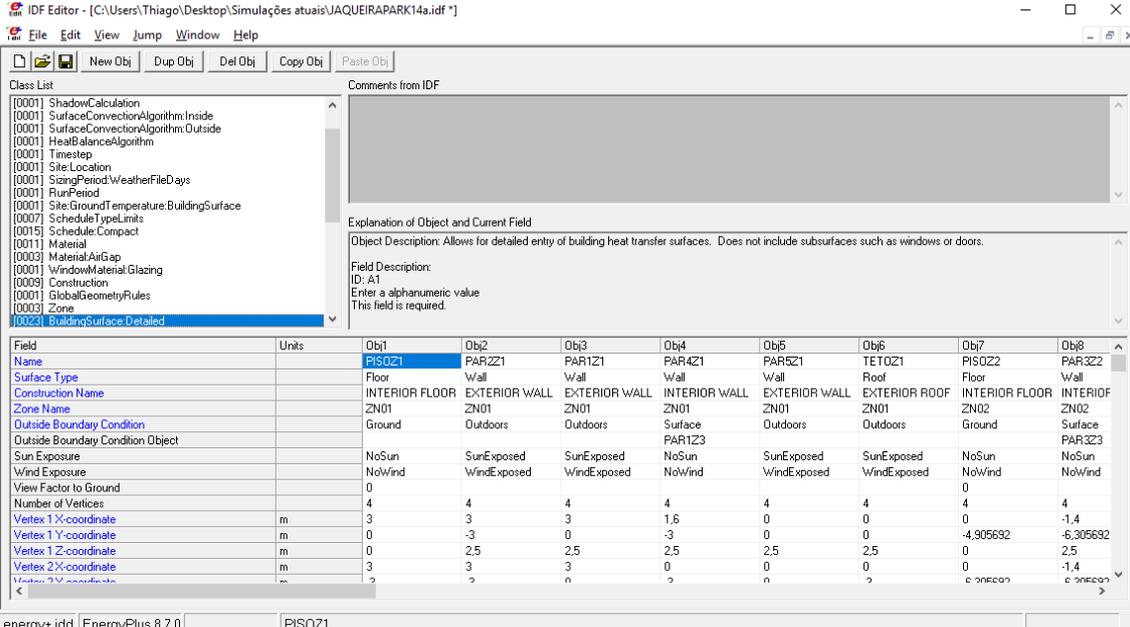
E na classe *zone*, as coordenadas dos pontos das origens de cada zona são inseridas automaticamente a partir do modelo geométrico do SketchUp, ver Figura 18.

Figura 18 - Propriedades Termo Físicas – Zone



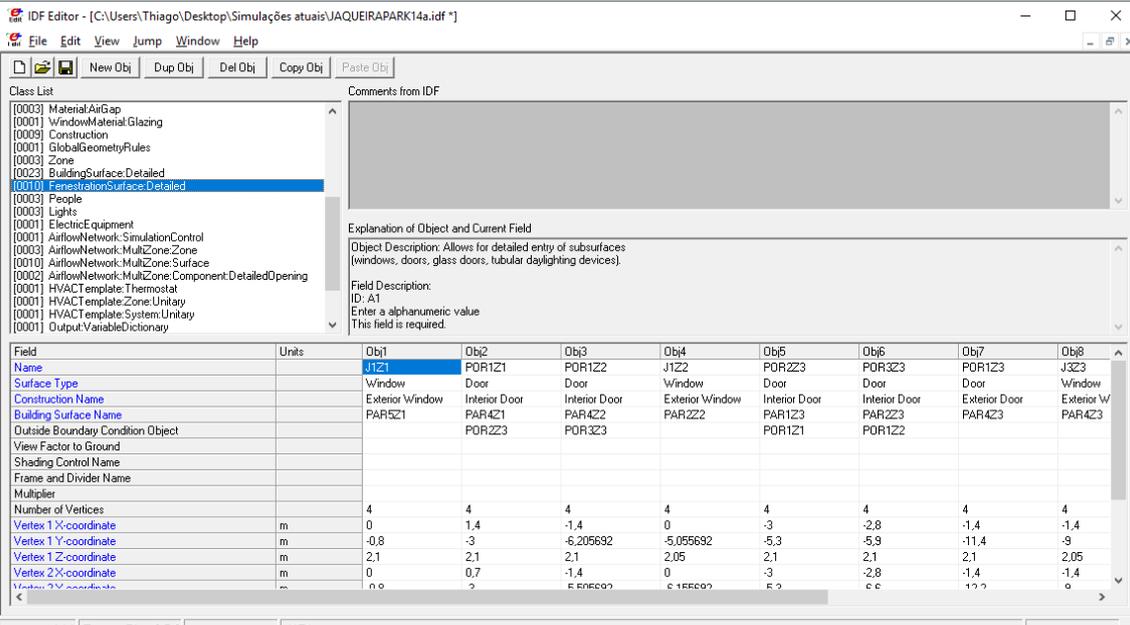
De forma similar, se a todas *superfícies* foram configuradas corretamente no modelo SketchUp todos os itens da classe *Building Surface Detailed* já devem estar preenchidos com seus respectivos tipos de parede associadas, exposição ao ambiente externo e as superfícies que fazem interseção (Figura 19). Já na classe, também já são preenchidos os detalhes referentes às aberturas de janelas e portas, como coordenadas de suas posições e seu tipo, classificada como porta ou janela, interna ou externa (Figura 20).

Figura 19 - Propriedades Termo Físicas - Building Surface Detailed



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		PISOZ1	PARZ21	PAR1Z1	PAR4Z1	PAR5Z1	TETOZ1	PISOZ2	PAR3Z2
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof	Floor	Wall
Construction Name		INTERIOR FLOOR	EXTERIOR WALL	EXTERIOR WALL	INTERIOR WALL	EXTERIOR WALL	EXTERIOR ROOF	INTERIOR FLOOR	INTERIOR WALL
Zone Name		ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN01	ZN02	ZN02
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Surface	Outdoors	Outdoors	Ground	Surface
Outside Boundary Condition Object					PAR1Z3				PAR3Z3
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	NoSun
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		0						0	
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	3	3	3	1,6	0	0	-4,905692	-6,306692
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	-3	0	-3	0	0	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	2,5
Vertex 2 X-coordinate	m	3	3	3	0	0	0	0	-1,4
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 20 - Propriedades Termo Físicas - Fenestration Surface Detailed

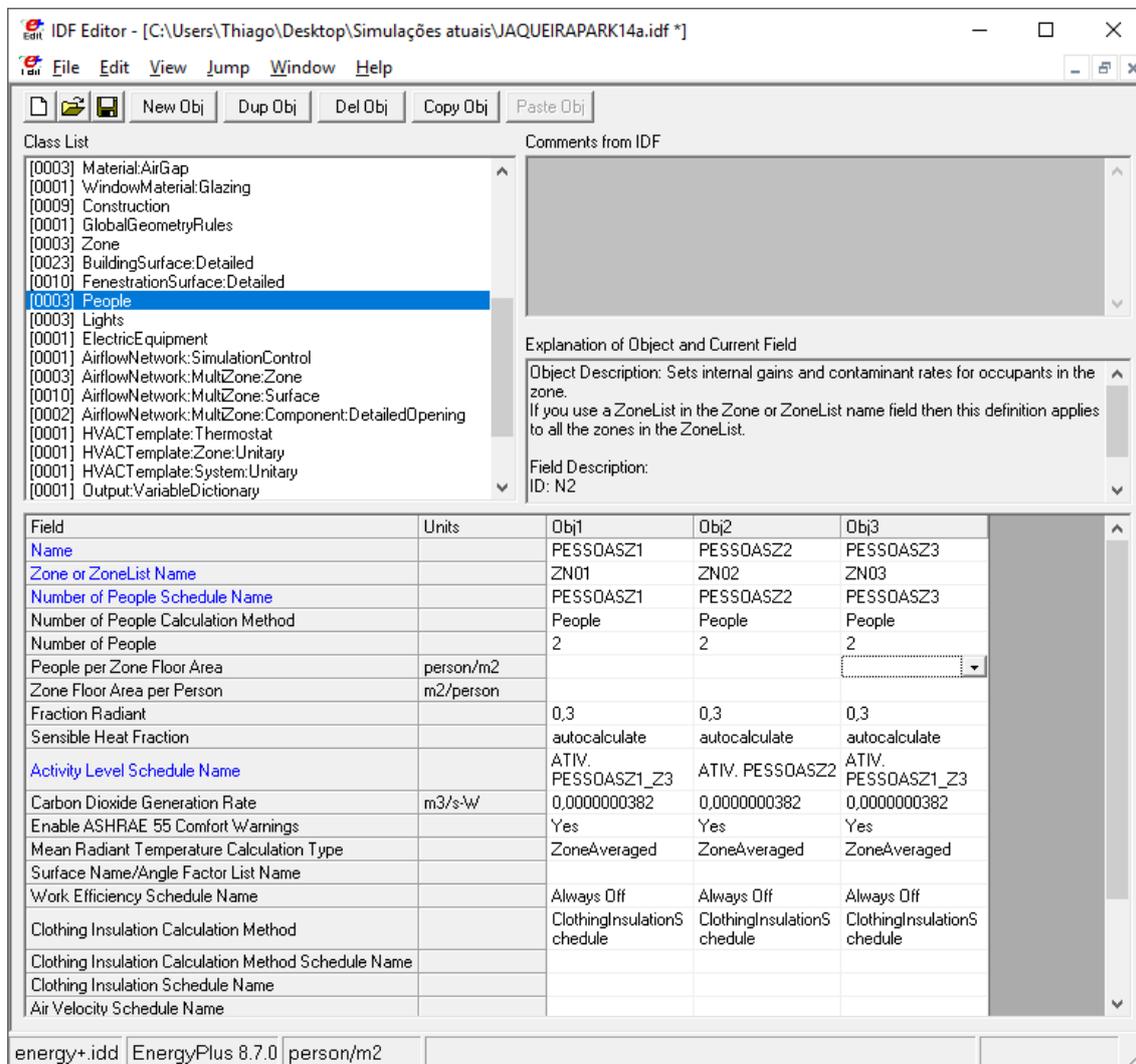


Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		J1Z1	POR1Z1	POR1Z2	J1Z2	POR2Z3	POR3Z3	POR1Z3	J3Z3
Surface Type		Window	Door	Door	Window	Door	Door	Door	Window
Construction Name		Exterior Window	Interior Door	Interior Door	Exterior Window	Interior Door	Interior Door	Exterior Door	Exterior W
Building Surface Name		PAR5Z1	PAR4Z1	PAR4Z2	PAR2Z2	PAR1Z3	PAR2Z3	PAR4Z3	PAR4Z3
Outside Boundary Condition Object			POR2Z3	POR3Z3		POR1Z1	POR1Z2		
View Factor to Ground									
Shading Control Name									
Frame and Divider Name									
Multiplier									
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	1,4	-1,4	0	-3	-2,8	-1,4	-1,4
Vertex 1 Y-coordinate	m	-0,8	-3	-6,205692	-5,055692	-5,3	-5,9	-11,4	-9
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,1	2,1	2,1	2,05	2,1	2,1	2,1	2,05
Vertex 2 X-coordinate	m	0	0,7	-1,4	0	-3	-2,8	-1,4	-1,4
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0

Agora chegamos aos itens referentes às cargas de pessoas, iluminação e equipamentos. Conforme mencionado anteriormente, as quantidades de

usuários deve ser estabelecida na classe *people*, para nosso caso de estudo duas pessoas deve ser selecionado os objetos referente às atividades dos ocupantes de cada zona no campo *activity level schedule name*, ver Figura 21. Os demais campos foram adotados os valores default do programa para o caso em estudo.

Figura 21 - Cargas Internas - Atividade dos Ocupantes



Conforme também mencionado anteriormente, as potências da iluminação de cada zona deve ser definida na classe *light*, para o nosso estudo de caso as potências foram divididas entre as zonas conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Potência de Iluminação

Zona	Iluminação (W)
Zona 1 - Dormitório	60
Zona 2 - Banheiro	60
Zona 3 - Sala/cozinha	120

As rotinas que associadas a cada zona devem ser selecionadas no campo *schedule name*, o qual já consta a o percentual de utilização da potência total de

iluminação e os horários de acionamento. Por fim, as potências devem ser incluídas de acordo com a Tabela 4. Os demais campos foram adotados os valores default do programa para o caso em estudo (ver Figura 22). Existe uma outra opção de entrada de dados que seria a as potências em W/m^2 , onde o próprio software faz a contada pela área da zona, a partir das taxas de demanda inseridas nessa opção.

Figura 22 - Cargas Internas – Iluminação

The screenshot shows the IDF Editor interface with the 'Lights' class selected. The main configuration area displays a table of fields for three zones (Z1, Z2, Z3). The 'Lighting Level' is set to 60 W/m2 for all zones, and 'Watts per Person' is set to 120. The status bar at the bottom indicates the current file is 'energy+.idd' and the unit is 'W/m2'.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		ILUMINACA0Z1	ILUMINACA0Z2	ILUMINACA0Z3
Zone or ZoneList Name		ZN01	ZN02	ZN03
Schedule Name		LAMPADAS_Z1Z2	LAMPADAS_Z1Z2	LAMPADAS_Z3
Design Level Calculation Method		LightingLevel	LightingLevel	LightingLevel
Lighting Level	W	60	60	120
Watts per Zone Floor Area	W/m2			
Watts per Person	W/person			
Return Air Fraction				
Fraction Radiant				
Fraction Visible				
Fraction Replaceable		1	1	1
End-Use Subcategory		General	General	General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No	No	No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Coefficient 1				
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Coefficient 2	1/K			

Conforme já mencionado, as potências dos equipamentos elétricos de cada zona devem ser definida na classe *electric equipment*, para o nosso estudo de caso as potências foram divididas entre as zonas conforme a Tabela 2 e Tabela 4.

As rotinas, já definidas, associadas a cada zona devem ser selecionadas no campo *schedule name*, o qual já consta a os horários de acionamento de cada um deles ao longo do dia. Por fim, as potências devem ser incluídas de acordo com a Tabela 2. Os demais campos foram adotados os valores default do programa (ver Figura 22).

Figura 23 - cargas Internas - Equipamentos Elétricos

Class List

- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0015] Schedule:Compact
- [0011] Material
- [0003] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0009] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules
- [0003] Zone
- [0023] BuildingSurface:Detailed
- [0010] FenestrationSurface:Detailed
- [0003] People
- [0003] Lights
- [0003] **ElectricEquipment**
- [0001] AirflowNetwork:SimulationControl
- [0003] AirflowNetwork:MultiZone:Zone
- [0010] AirflowNetwork:MultiZone:Surface
- [0002] AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening
- [0001] HVAC:Template:Thermostat

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Sets internal gains for electric equipment in the zone.
If you use a ZoneList in the Zone or ZoneList name field then this definition applies to all the zones in the ZoneList.

Field Description:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		TVZ3	VENTILADOR	CHUVEIRO
Zone or ZoneList Name		ZN03	ZN03	ZN02
Schedule Name		TV	VENTILADOR	CHUVEIRO ELETTRICO
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel	EquipmentLevel	EquipmentLevel
Design Level	W	85	65	3500
Watts per Zone Floor Area	W/m2			
Watts per Person	W/person			
Fraction Latent				
Fraction Radiant				
Fraction Lost				
End-Use Subcategory		General	General	General

energy+.idd | EnergyPlus 8.7.0 | W/m2

3.1.6 Parâmetros de Entrada da Ventilação

Nesta seção serão apresentados os itens pertinentes à ventilação natural e artificial. No item mecanismos de ventilação natural Energyplus são modelados através de uma rede de fluxo em zonas múltiplas, podendo ser uma ventilação forçada, onde a renovação de ar do ambiente é realizada por equipamentos ou por ventilação natural, na qual a movimentação e ar é realizada pelas forças naturais devido às diferenças de temperaturas e pressão.

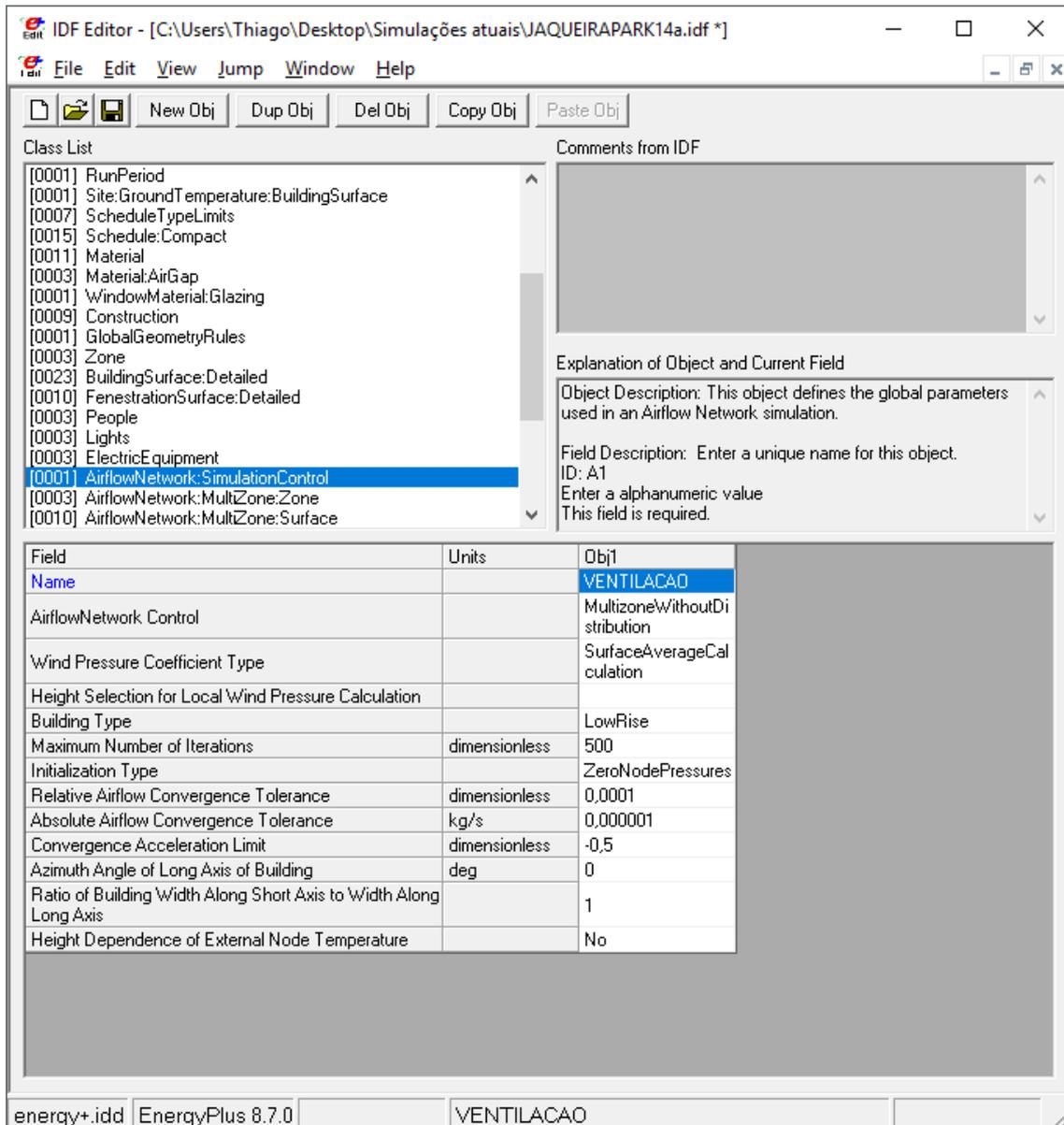
O primeiro passo para a modelagem desta etapa é a introdução dos dados na classe *airflow network: simulation control*, deve ser escolhido o tipo de controle de ventilação, entre eles estão disponíveis:

- *Multizone with distribution*: onde o cálculo de ventilação das zonas é realizado durante toda a simulação, incluindo o impacto do sistema de distribuição do ar;
- *Multizone without distribution*: Onde o cálculo de ventilação das zonas ocorre durante toda a simulação, porém não há modelagem do sistema de distribuição do ar, mesmo que este seja um dado de entrada do programa;
- *Multizone with distribution only during fan operation*: Nesta opção o cálculo de ventilação das zonas assim como o impacto de distribuição de ar ocorre somente quando o ventilador do sistema de ar está funcionando;
- *No multizone or distribution*: não há cálculos referentes à ventilação nesta opção.

A opção selecionada para o estudo de caso foi a opção *Multizone with distribution*, conforme Figura 24.

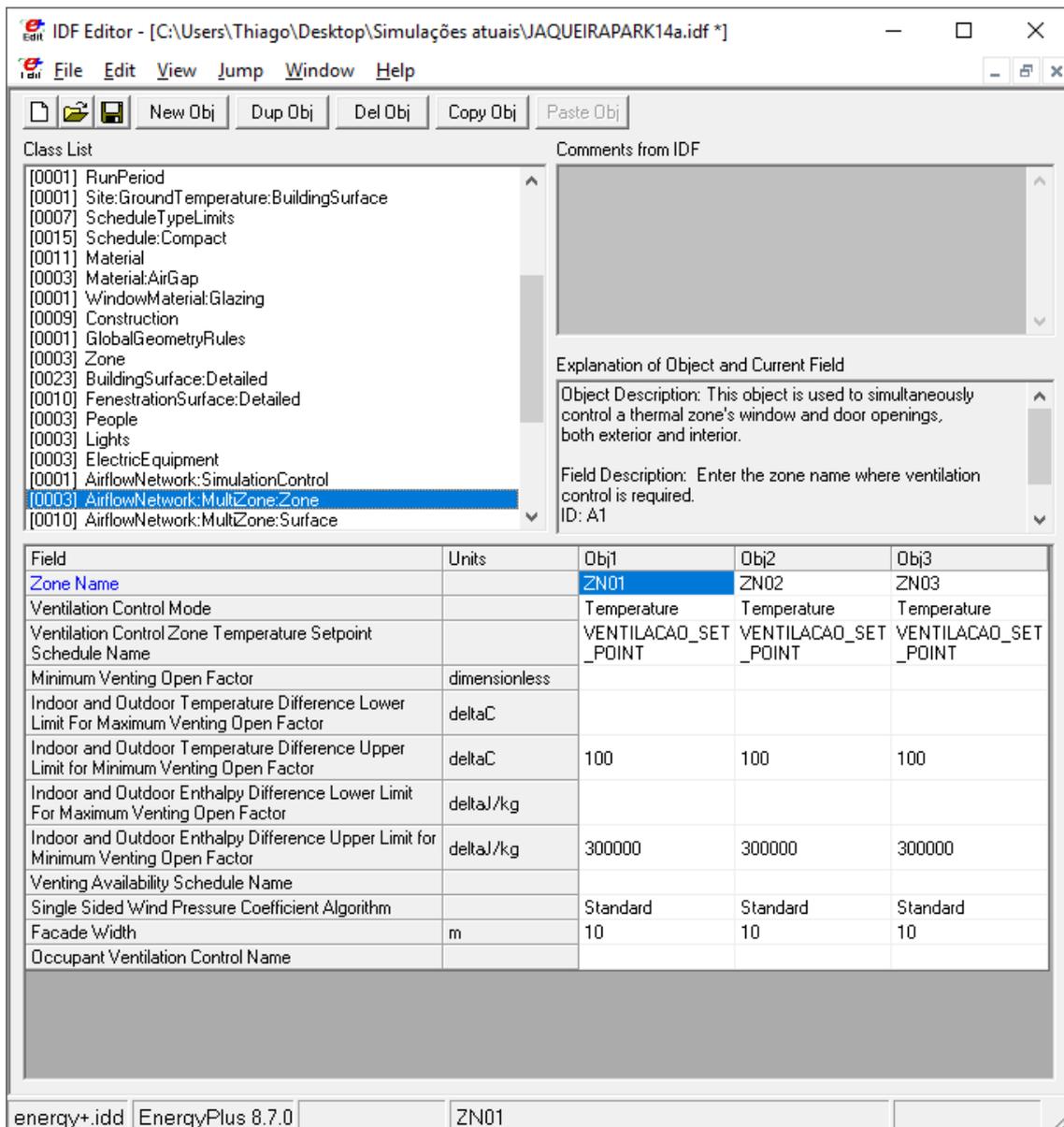
O campo *building type* deve ser definido pela proporção altura total da edificação por sua largura, se a altura três vezes menor que a largura, deve-se definir como *lowrise*, caso contrário *highrise*. Os demais parâmetros podem ser usados como os pré-definidos pelo programa.

Figura 24 - Ventilação - Simulation Control



Na classe *airflow network: multizone: zone*, deve ser definida as zonas as quais será permitida a ventilação. E, no campo *ventilation control mode*, deve-se optar pelo controle através temperatura, o qual garante que ao atingir a temperatura definida a janelas serão abertas permitindo a circulação da ventilação natural, essa opção garante um maior controle térmico adaptativo. No campo seguinte deve-se optar pelo *schedule* já definido anteriormente, “VENTILACAO_SET_POINT”, que define a temperatura na qual a ventilação será permitida (ver Figura 25) . Os demais itens podem ser considerados como os parâmetros pré-estabelecidos pelo software.

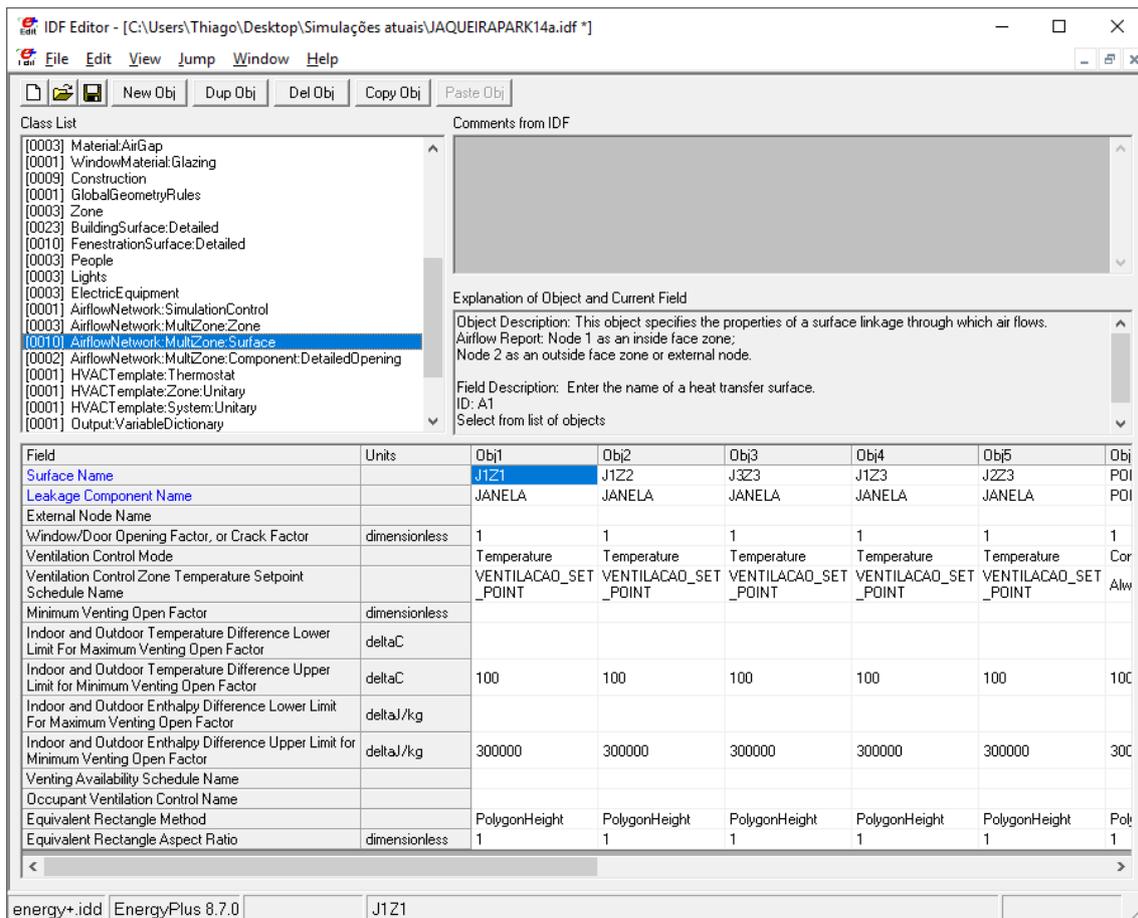
Figura 25 - Ventilação – Zone



Após a modelagem realizada no SketchUp, com auxílio do plugin Euclid, é possível incluir todas as informações pertinentes às aberturas, janelas e portas. E, na classe *airflow network: multizone surface* (Figura 26), deve-se selecionar as identificações de cada abertura no campo *leakage component name*, definindo-o como janela ou porta, por exemplo, como adotado aqui no caso de estudo. A criação destes itens que aparecerão no campo *leakage component name* é feita na classe *airflow network: multizone componente detailed opening*, conforme mostrada na Figura 27.

Para completar o preenchimento da classe *airflow network: multizone surface*, deve-se ainda entrar com os dados no campo *wind/door opening fator or crack fator* deve-se especificar se as janelas são operáveis, apresentando o calor da abertura. O Energyplus utiliza uma combinação de fatores para determinar a área da abertura das portas e janela. Deve-se inserir um para as janelas operáveis e zero para as fixas, não operáveis. No nosso caso de estudo todas as janelas e portas são operáveis.

Figura 26 - Ventilação – Surface

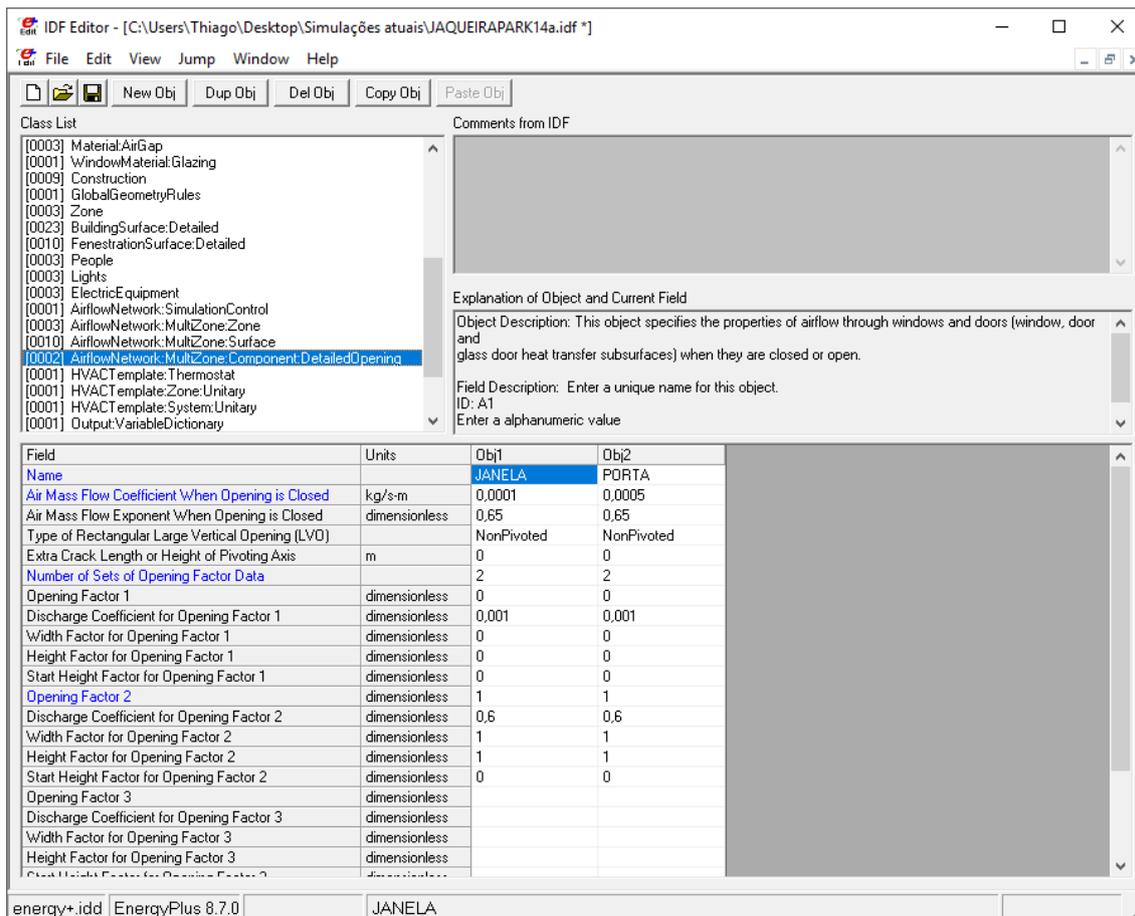


A classe *airflow network: multizone componente detailed opening*, especifica a propriedade da ventilação natural através das portas e janelas quando as mesmas estão abertas ou fechadas. O campo *air mass flow coeficiente when opening is closed*, define o volume de ar que ultrapassa as frestas das aberturas mesmo quando estão fechadas, sendo definidas para cada caso, conforme Figura 27.

No campo *type of large vertical opening*, deve-se especificar os tipos das portas e janelas utilizadas na edificação. O nosso caso de estudo utilizou-se janelas e portas de abertura no eixo vertical, as do tipo *non-pivoted*.

Já no campo *number of sets of opening factor data*, define-se o número de estágios de abertura das janelas e portas. Caso haja estágios intermediários devem ser inseridos, entretanto independentemente da existência desses estágios intermediários, sempre deve-se ter o primeiro e o último fator, no campo *opening factors*, como valores zero e um, respectivamente. No caso de estudo, foram consideradas janelas e portas convencionais com abertura total, e por isso a definição de apenas dois estágios de abertura, sendo totalmente fechada ou totalmente aberta. Os coeficientes descargas são os valores percentuais da taxa de infiltração do ar quando as aberturas estão fechadas ou abertas, e foram definidas conforme Figura 27.

Figura 27 - Ventilação - Detailed Opening



Já com relação ao condicionamento de ar, para o caso de estudo foi modelado um sistema individual para apenas uma zona térmica, conforme já mencionado anteriormente. O sistema adotado foi o sistema que utiliza aparelho de climatização Split.

Para definição do sistema no Energyplus é necessário que seja definido a temperatura na qual o termostato dispara a condensadora do equipamento, mantendo a temperatura do ambiente em seu em torno. Para o nosso caso de estudo definiu-se 25°C, como temperatura de início de resfriamento (ver Figura 28). Para o caso de estudo situado em Recife, cidade de clima consideravelmente quente e com baixa amplitude térmica, para o presente estudo de caso não foram considerados sistemas de aquecimento de ar.

Conforme mencionado, o sistema definido para o estudo de caso é o sistema de Split, o qual é definido no Energyplus por meio de um *template* com parâmetros pré-definidos, já incluídos na classe *HVAC template zone unitary* (Figura 29).

Já na classe *HVAC template zone system unitary* deve-se incluir os dados do sistema de climatização propriamente dito, a zona térmica a qual o mesmo está atrelado, sua rotina de acionamento, já definido na classe *schedule compact* (ver Figura 30).

Figura 28 - HVAC – Termostato

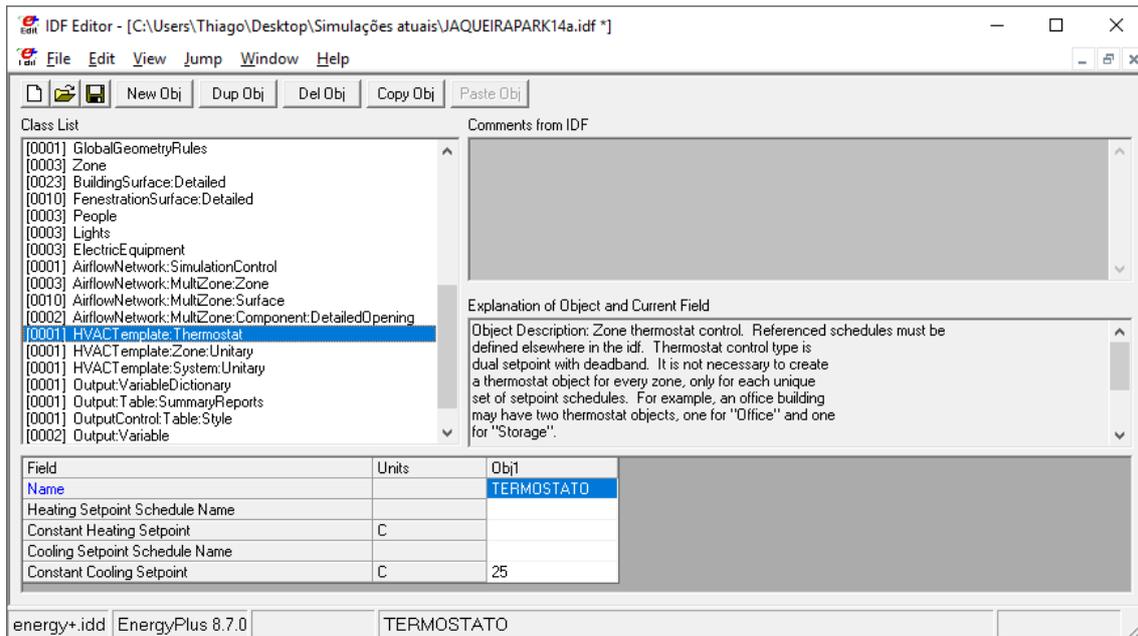


Figura 29 - HVAC – Split

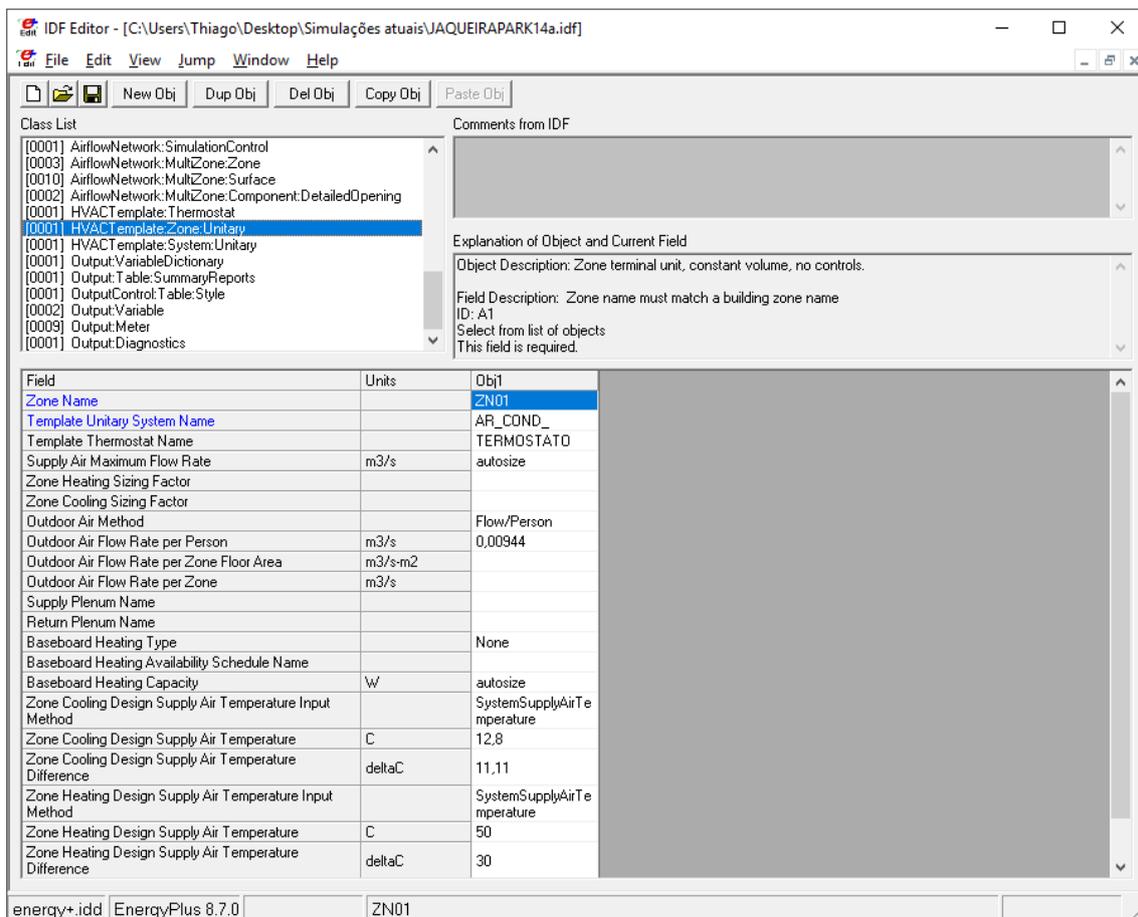
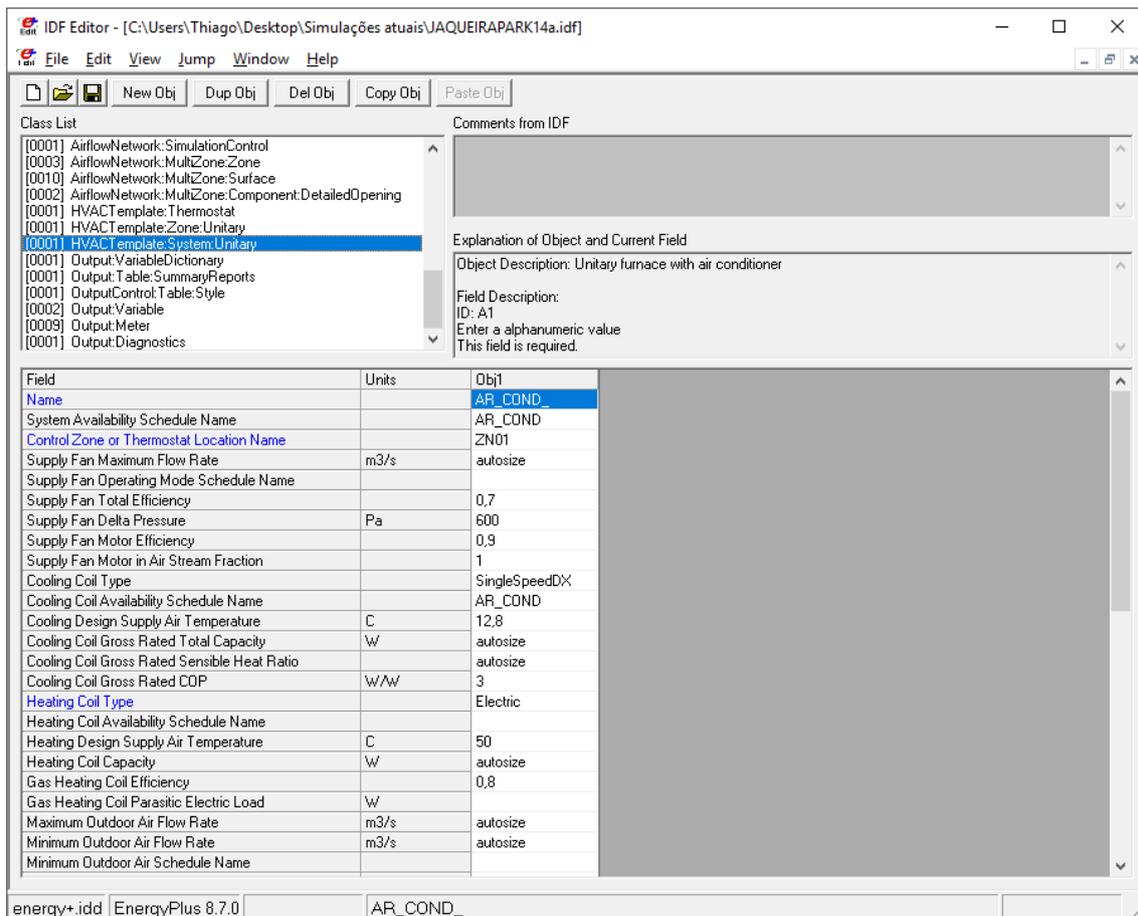


Figura 30 - HVAC – Sistema



3.1.7 Parâmetros de Saída

Esta seção tem por objetivo ilustrar a forma como configura a os dados extraídos do software. O Energyplus contém diversas variáveis calculáveis que podem ser extraídas a partir de todos inseridos anteriormente, a escolha desses dados é função da análise que se deseja proceder. Conforme mencionado nos itens anteriores, objetivo das simulações aqui são medir o conforto térmico e o consumo de energia para as diversas comparações realizadas. Desta forma, aqui serão apresentadas as configurações necessárias para a obtenção dos dados pertinentes à esta análise.

Inicialmente, faz-se necessária a configuração, na classe *output variable dictionary*, do tipo de arquivo o qual será utilizado como base para a leitura de dados. Os arquivos .idf são os mais aconselhados pois tem uma maior compatibilidade, conforme Figura 31.

Em seguida, em caráter facultativo, pode-se solicitar a conversão das unidades de alguns dados de saída através da classe *output control table style* (Figura 32).

Figura 31 - Output - Variable Dictionary

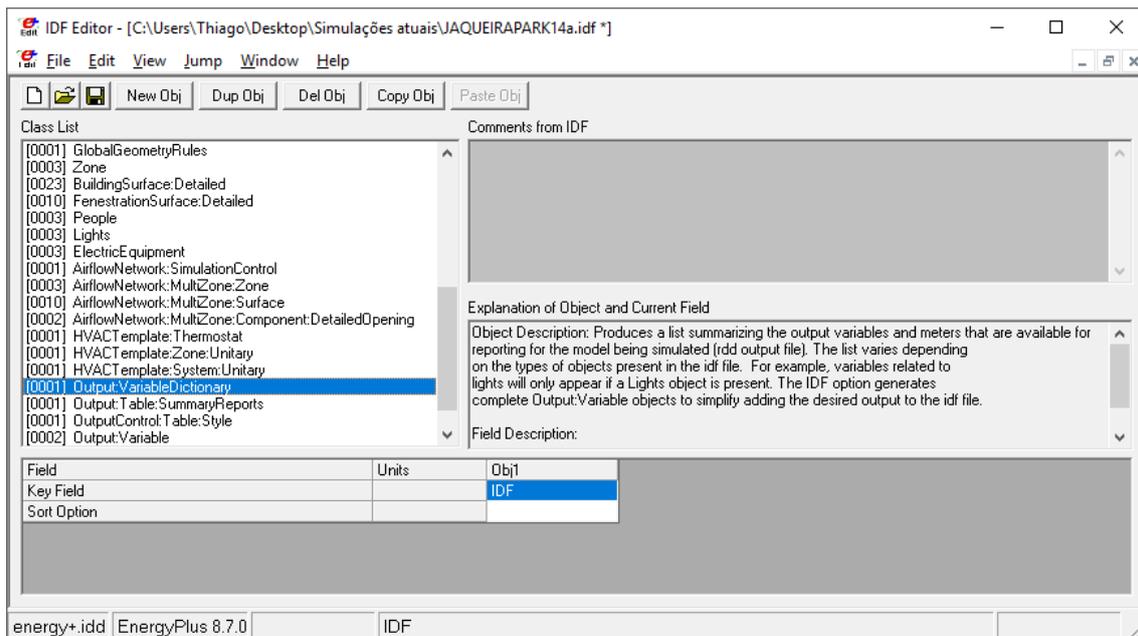
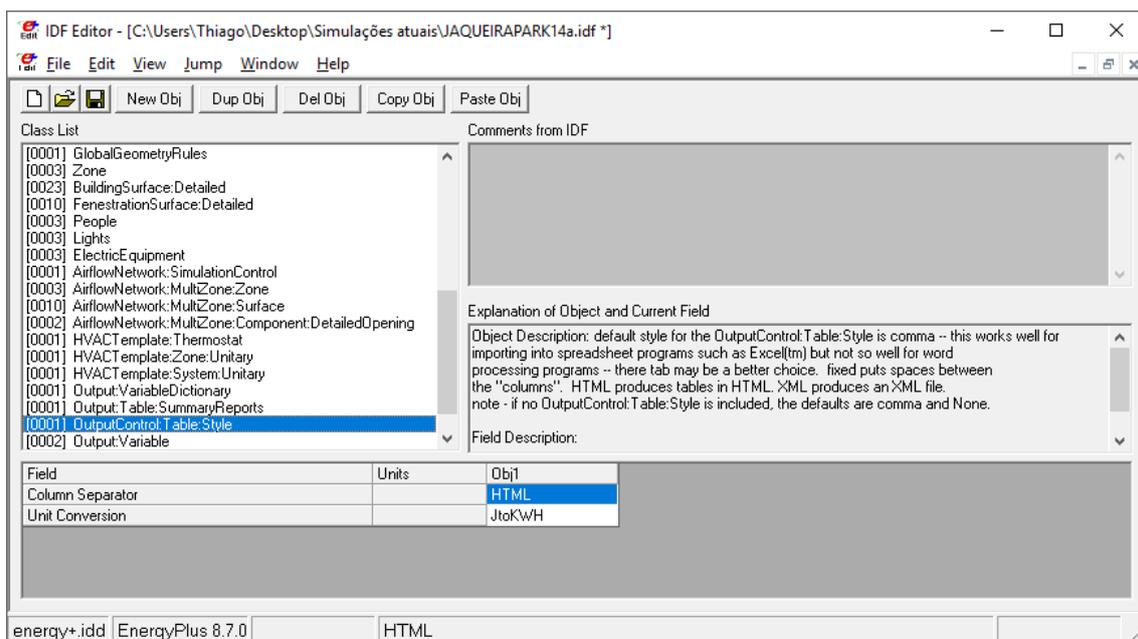


Figura 32 - Output - Table Style



Na classe *output variable* são definidas as variáveis que desejam ser avaliadas, e a periodicidade com as quais as mesmas são calculadas e exibidas. Esses valores exibidos através um arquivo .xls que pode ser lido em software de planilhas de dados como o MS Excel, por exemplo. Desta forma os dados podem ser tratados e manipulados para uma melhor apresentação dos dados, como serão apresentados no item a seguir através de gráficos, por exemplo.

No presente caso de estudo foram realizadas duas simulações para a mesma, visto que é necessária definir o apenas uma periodicidade por simulação. Ou seja, não é possível obter dados com a periodicidade horária e mensal numa mesma simulação. E como desejava-se obter alguns dados como consumos em intervalos mensais, de modo a facilitar o processamento dos

O consumo de energia elétrica, é detalhado por (Souza, 2010), como o somatório dos consumos energéticos do sistema de condicionamento de ar, seja para resfriamento, aquecimento ou ventilação; e dos equipamentos da edificação, incluindo sua iluminação, os quais são dados de entrada do Energyplus. E segundo (Duarte, 2014), o consumo de energia elétrica do sistema de ar condicionado é função do desempenho térmico da edificação e da eficiência do sistema.

As variáveis de saída solicitadas do software de simulação foram a temperatura externa do ar horária (°C), a temperatura neutra ou de conforto horária (°C), a temperatura operativa interna horária das zonas térmicas (°C) e a temperatura do ar interno horária das zonas térmicas (°C). As temperaturas de conforto são utilizadas para o cálculo da faixa de conforto e as temperaturas operativas para a verificação da condição de conforto ou não.

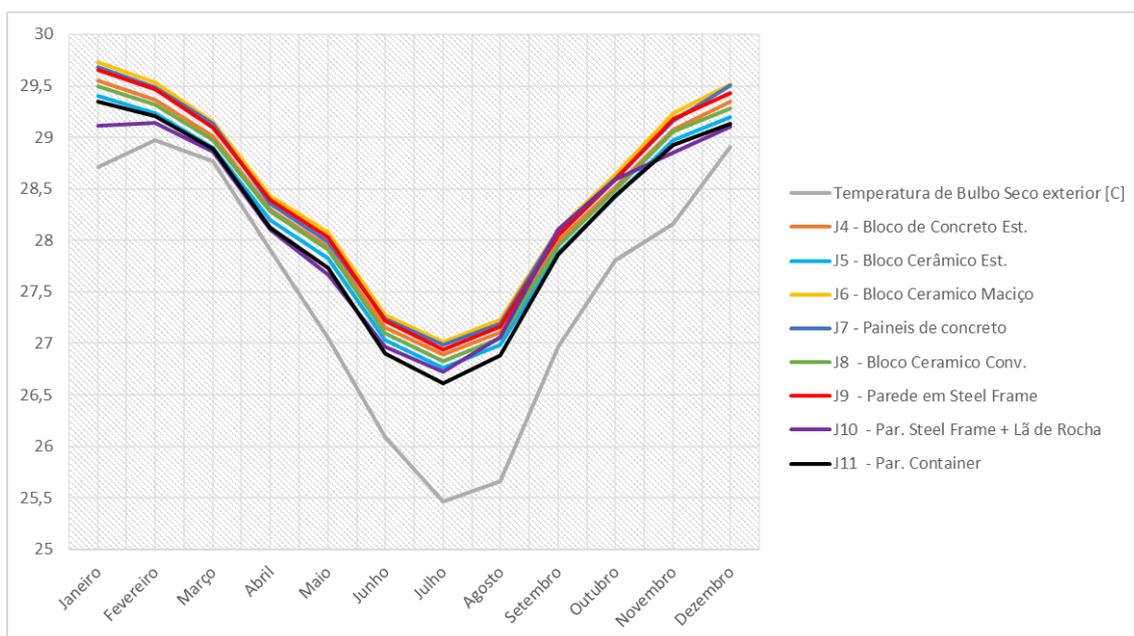
3.2 RESULTADOS

3.2.1 Avaliação do Impacto da Mudança dos Materiais de Vedação

Fazendo uso das metodologias e parâmetros citados no item anterior, chegamos aos seguintes resultados, comparando as variações das temperaturas operativas zona a zona, para a etapa de variação dos materiais de vedação, considerando a fachada principal voltada para o lado norte.

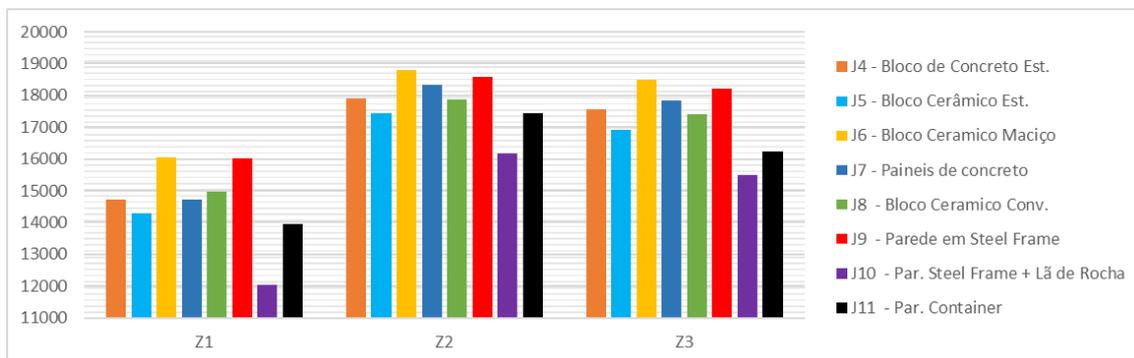
Para a Zona 1 (Gráfico 1), climatizada artificialmente, as temperaturas médias mensais são um pouco mais baixas que as obtidas nas demais zonas, quando comparados os Gráfico 1, Gráfico 3 e Gráfico 4. Quando comparadas as alterações dos materiais, observamos que as variações de temperatura entre a simulação que apresentou maiores temperaturas, vedações em blocos cerâmicos maciços, e a simulação que apresentou menor temperatura, vedações em das paredes utilizadas em contêineres, apresentaram uma variação de 0,32°C, apenas, o que não tão significativo. Visto que as temperaturas médias mensais não são a melhor forma de análise de variações térmicas de edificações.

Gráfico 1 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 1 para diferentes materias de envoltória



Entretanto se considerado o indicador grau-hora, que representa o somatório dos graus hora a hora necessários para atingir o intervalo de temperaturas de conforto, temos um total de 16.052 graus hora de resfriamento necessários as simulações que utilizavam as vedações em parede de blocos cerâmicos maciços (piores resultados, segundo o indicador), enquanto que para as simulações que consideraram as vedações em steel frame com lã de rocha obtivemos apenas 12.054 graus hora de resfriamento necessários, conforme Gráfico 2, o que representa 24,91% de diferença (ver Tabela 5).

Gráfico 2 - Resumo dos Indicadores Grau Hora para diferentes materias de envoltória



Essa diferença não é tão perceptível quando analisadas as temperaturas médias mensais, mas quando são analisados os indicadores grau-hora (Gráfico 2) observa-se o quanto a diferença hora a hora impacta na temperatura interna da edificação, o que deixa mais clara a discrepância entre os resultados. O Gráfico 2 apresenta os valores dos indicadores para cada zona para cada material; já a Tabela 5 mostra o resumo dos indicadores grau hora para todas as zonas e os percentuais em relação ao material que obteve, entre os resultados, o valor máximo para o indicador de cada zona neste caso obtivemos para todas as zonas o valor para as vedações em bloco cerâmico maciço.

Tabela 5 - Resumo dos Indicadores Grau Hora

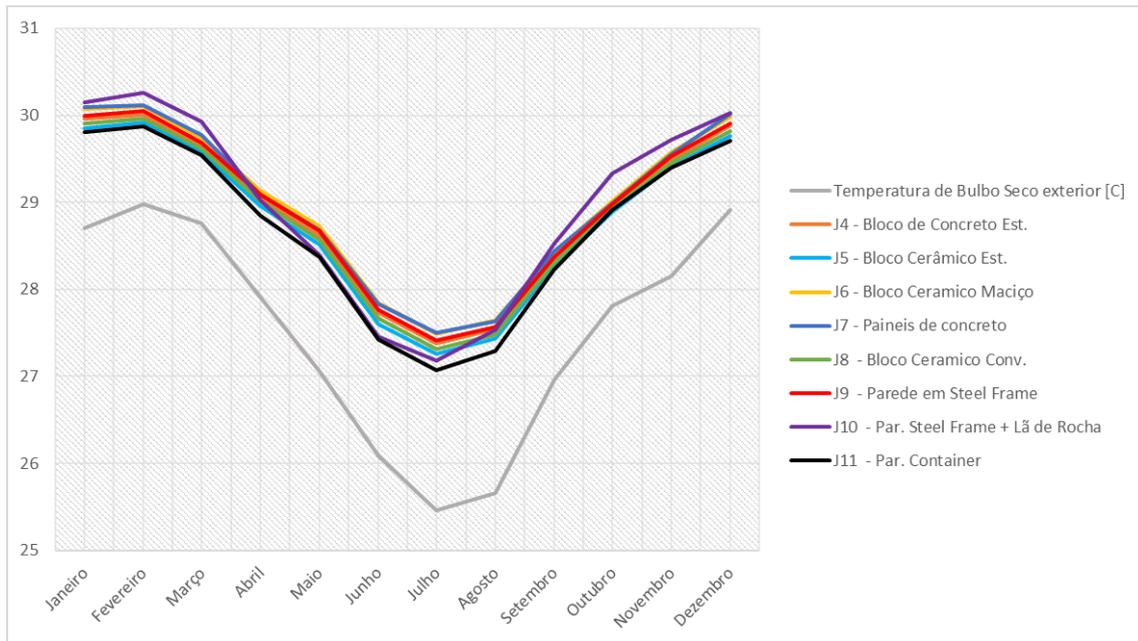
		Z1	Z2	Z3			Z1	Z2	Z3
J4 - Bloco de Concreto Est.	Indicador Grau-hora	14738,38	17916,98	17553,70	J8 - Bloco Ceramico Conv.	Indicador Grau-hora	14965,76	17861,29	17402,43
	% (GH)	8,19%	4,69%	5,08%		% (GH)	6,77%	4,99%	5,90%
J5 - Bloco Cerâmico Est.	Indicador Grau-hora	14291,79	17448,77	16920,67	J9 - Parede em Steel Frame	Indicador Grau-hora	16030,85	18580,92	18224,14
	% (GH)	10,97%	7,18%	8,50%		% (GH)	0,13%	1,16%	1,45%
J6 - Bloco Ceramico Maciço	Indicador Grau-hora	16052,28	18798,62	18492,97	J10 - Par. Steel Frame + Lã de Rocha	Indicador Grau-hora	12054,10	16167,23	15494,33
	% (GH)	0,00%	0,00%	0,00%		% (GH)	24,91%	14,00%	16,22%
J7 - Paineis de concreto	Indicador Grau-hora	14731,55	18324,02	17830,37	J11 - Par. Container	Indicador Grau-hora	13965,63	17430,14	16236,64
	% (GH)	8,23%	2,52%	3,58%		% (GH)	13,00%	7,28%	12,20%

Para a Zona 2 (Gráfico 3), que é uma a zona não climatizada artificialmente, observamos que as variações de temperatura entre a simulação que apresentou maiores temperaturas, vedações em blocos cerâmicos maciços, e a simulação que apresentou menor temperatura, as que consideraram as vedações de parede de contêineres, apresentaram uma variação de 0,27°C.

O indicador grau-hora ilustrou como piores resultados as vedações com alvenarias tijolos cerâmico maciços, tendo um total de 18.799 graus hora, enquanto que para o para as simulações que consideraram as vedações em steel frame com lã de rocha obtivemos apenas 16.167 graus hora, o que representa 14,00% de diferença, Tabela 5.

Gráfico 3 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 2 para diferentes

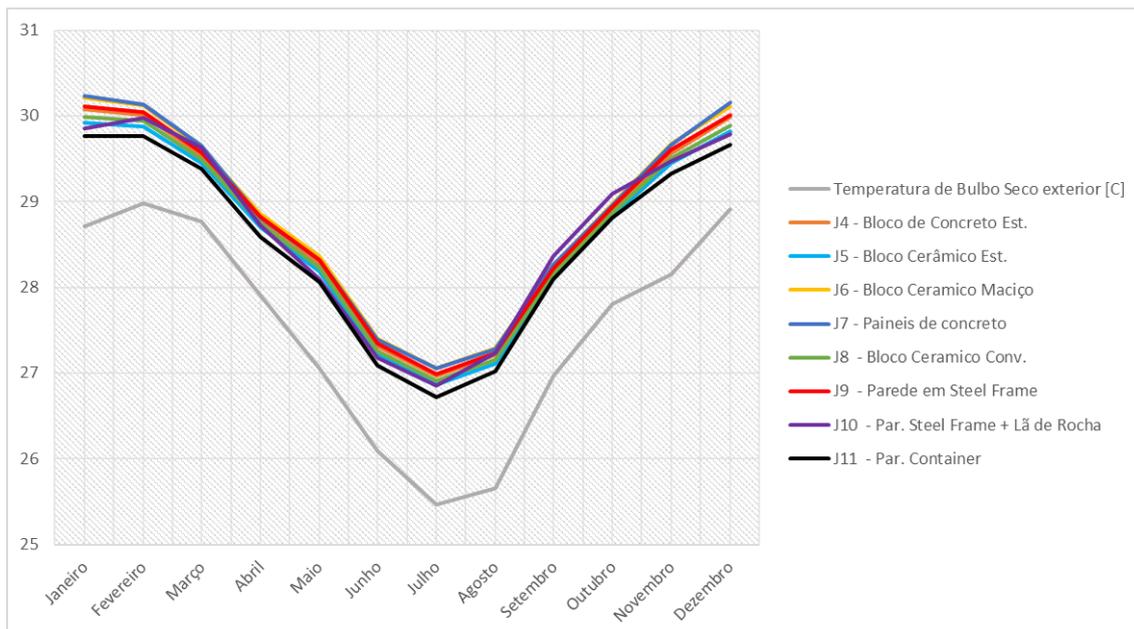
materiais de envoltória



Para a Zona 3 (Gráfico 4), que também é uma zona não condicionada artificialmente, observamos que as variações de temperatura entre a simulação que apresentou maiores temperaturas, que foram as vedações em blocos cerâmicos maciços, e a simulação que apresentou menor temperatura, que foram as que consideraram as vedações de parede de contêineres, apresentaram uma variação de temperatura de 0,30°C.

Já o indicador grau-hora ilustrou como piores resultados, novamente, as vedações em blocos cerâmicos maciços, tendo um total de 18.493 graus hora, enquanto que para as simulações que consideraram as vedações em steel frame com lã de rocha obtivemos apenas 15.494 graus hora, o que representa 16,22% de diferença, Tabela 5.

Gráfico 4 - Comparação entre as Temperaturas da Zona 3 para diferentes materiais de envoltória

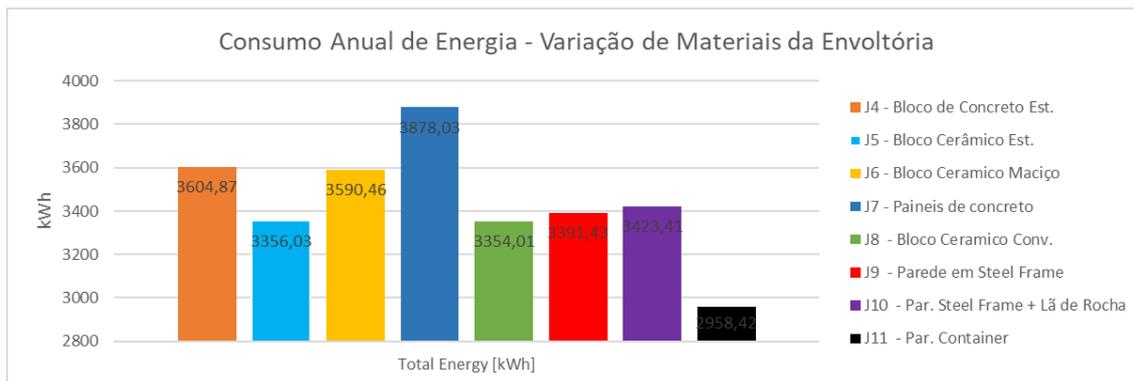


Desta forma, podemos observar que as vedações que consideraram os blocos cerâmicos maciços obtiveram os piores resultados de desempenho térmico para ambas as zonas térmicas da edificação analisada. Já as paredes que consideradas com steel frame com lã de rocha obtiveram os melhores resultados para ambas as zonas, de forma semelhante, segundo o indicador grau hora. Já para as temperaturas médias mensais as paredes em contêineres obtiveram melhores resultados para as três zonas.

Ambas as vedações possuem materiais isolantes em suas composições (materiais de baixa condutividade térmica, como pode ser visto e comparado na Tabela 3), que no presente estudo caso foi adotada lã de rocha. Podemos ver, claramente a relação, entre utilização deste de material impactando no desempenho térmico da edificação. Estes retardam a ação do calor da radiação do sol que incide diretamente sobre as superfícies.

Com relação ao consumo energético, o qual foi extraído diretamente do Energyplus, é possível observar no Gráfico 5 que o valor máximo de consumo energético total anual foi 3878,3 kWh, para paredes em painéis de concreto, enquanto que as vedações em contêineres com isolamento em lã de rocha obtiveram o menor consumo total, de 2958,42 kWh, o que representa uma redução anual de até 23,71% ao comparar-se esses dois sistemas construtivos.

Gráfico 5 - Consumo Anual de Energia para diferentes materias de envoltória



No presente estudo de caso, o consumo energético se difere apenas pelo consumo do condicionamento de ar, visto que as rotinas de ocupação e uso de equipamentos são constantes, e, apenas o condicionamento de ar é variável em função da temperatura do ambiente, exigindo maior ou menor potência do equipamento de ar condicionado para manter a temperatura definido no termostato. Logo, análise mais relevante para o consumo energético é referente à zona 1.

O Gráfico 1 mostra que ao longo de todo o ano as temperaturas operativas internas da Zona 1, condicionada artificialmente, são maiores para as vedações em blocos cerâmicos maciços, em painéis de concreto e em blocos de concreto estrutural, o que é refletido diretamente no consumo energético, ilustrado no Gráfico 5. As paredes destes materiais possuem alta condutividade térmica e por possuírem homogeneidade, devido às grandes espessuras dos mesmos materiais (sem resistência de camadas de ar, por exemplo), apresentam menor resistência ao fluxo de calor sendo propensas a altas transmissões de calor para os ambientes internos; não sendo adequadas para o clima estudado. Já as paredes com materiais isolantes e camadas com maiores resistências térmicas apresentam menores temperaturas internas médias e, por consequência, menor consumo energético.

Quando consideradas as taxas aplicadas pela concessionária às residências, na região, de R\$ 0,68 por kWh, podemos observar que a diferença anual seria da ordem R\$631,60, o que seria bastante relevante quando considerada a vida útil de 25 anos, por exemplo, teríamos uma economia de R\$15.790,10.

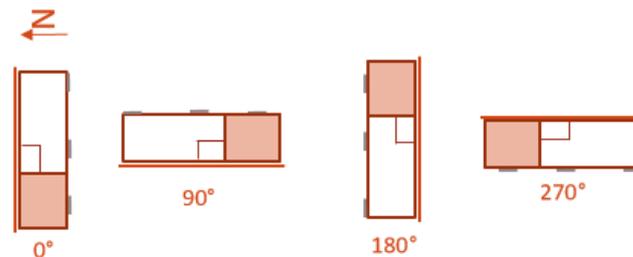
3.2.2 Avaliação do Impacto do Mudança da Orientação da Locação da Edificação

Para a avaliação da influência da orientação no desempenho termo energético da edificação, em análise, como já citado, utilizou-se a vedação em blocos cerâmicos de oito furos. Devido à ser o tipo mais comum utilizado nas construções brasileiras. A laje de piso e teto foi a mesma considerada na análise anterior, laje maciça em concreto com espessura de 20 cm.

Realizou-se então uma comparação dos resultados entre as temperaturas operativas internas do ar zona a zona. Vale-se salientar que a modificação da

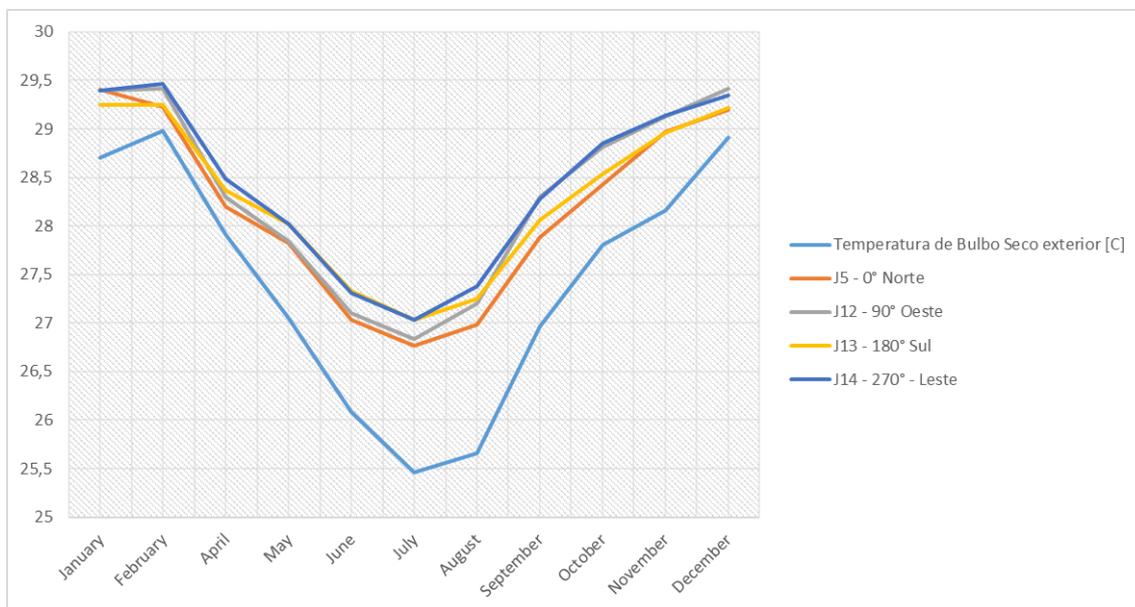
locação da edificação se deu pela rotação em sentido anti-horário da edificação, gerando assim a mais três simulações diferentes (ver Figura 35). E, inicialmente (na situação, 0°) já apresentada na seção anterior, a fachada principal está voltada para orientação norte, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 35 - Simulações com relação a orientação da edificação



Para a Zona 1, que é uma zona condicionada artificialmente, pode ser observado no Gráfico 6 que as variações de temperatura entre a simulação que apresentou maiores temperaturas médias, que foi o modelo com rotação de 270° em relação à orientação inicial considerada (fachada principal voltada para o lado leste), e a simulação que apresentou menor temperatura, que foi o modelo com rotação de 0° (fachada principal voltada para o lado norte); foram de aproximadamente 0,22°C.

Gráfico 6 - Comparação de Temperaturas das Zonas 1 para diferentes orientações

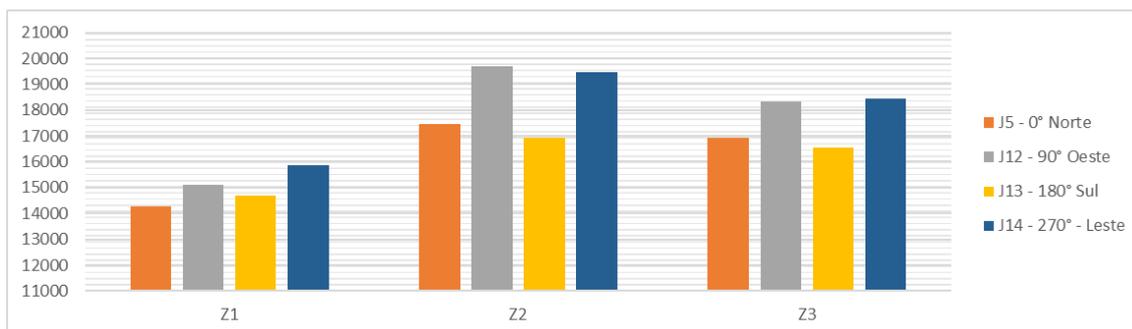


Já o indicador grau-hora ilustrou como piores resultados o modelo com rotação de 270°, tendo um total de 15.860 graus-hora, enquanto que para as simulações que consideraram a rotação 0° obtivemos 14.292 graus-hora, o que representa 9,89% de diferença, conforme Tabela 6. De maneira semelhante, o Gráfico 7 ilustra os resultados obtidos para os indicadores grau hora.

Tabela 6 - Resumo dos Indicadores Grau Hora

		Z1	Z2	Z3			Z1	Z2	Z3
J5 - 0° Norte	Indicador Grau-hora	14291,79	17448,77	16920,67	J13 - 180° Sul	Indicador Grau-hora	14697,33	16936,44	16562,99
	% (GH)	9,89%	11,33%	8,19%		% (GH)	7,33%	13,93%	10,13%
J12 - 90° Oeste	Indicador Grau-hora	15109,85	19677,54	18343,63	J14 - 270° - Leste	Indicador Grau-hora	15860,00	19471,65	18430,58
	% (GH)	4,73%	0,00%	0,47%		% (GH)	0,00%	1,05%	0,00%

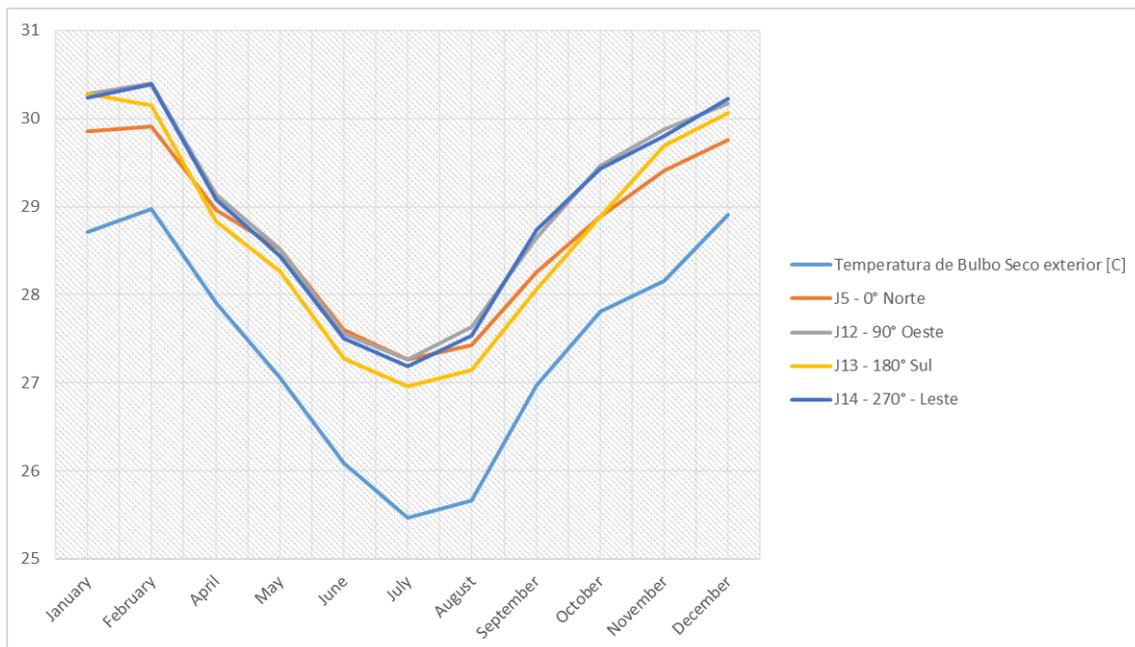
Gráfico 7 - Resumo dos Indicadores Grau Hora para Diferentes Orientações



Para a Zona 2, que não é uma a zona condicionada artificialmente, pode ser observado no Gráfico 8 que as variações de temperatura entre simulação que apresentou maiores temperaturas médias, que foi o modelo com rotação de 90° (fachada principal voltada para o lado oeste), tendo valores praticamente idênticos aos com rotação 270° (com fachada principal voltada para o leste). E a simulação que apresentou menores temperaturas, que foi o modelo com rotação de 180° (fachada principal voltada para o lado sul); estes modelos apresentaram uma variação de temperatura de 0,33°C.

Já o indicador grau-hora ilustrou como piores resultados o modelo com rotação de 90°, tendo um total de 19.678 graus-hora, enquanto que para as simulações que consideraram as rotações 180° de obtivemos 16.036 graus-hora, o que representa 13,93% de diferença, Tabela 6.

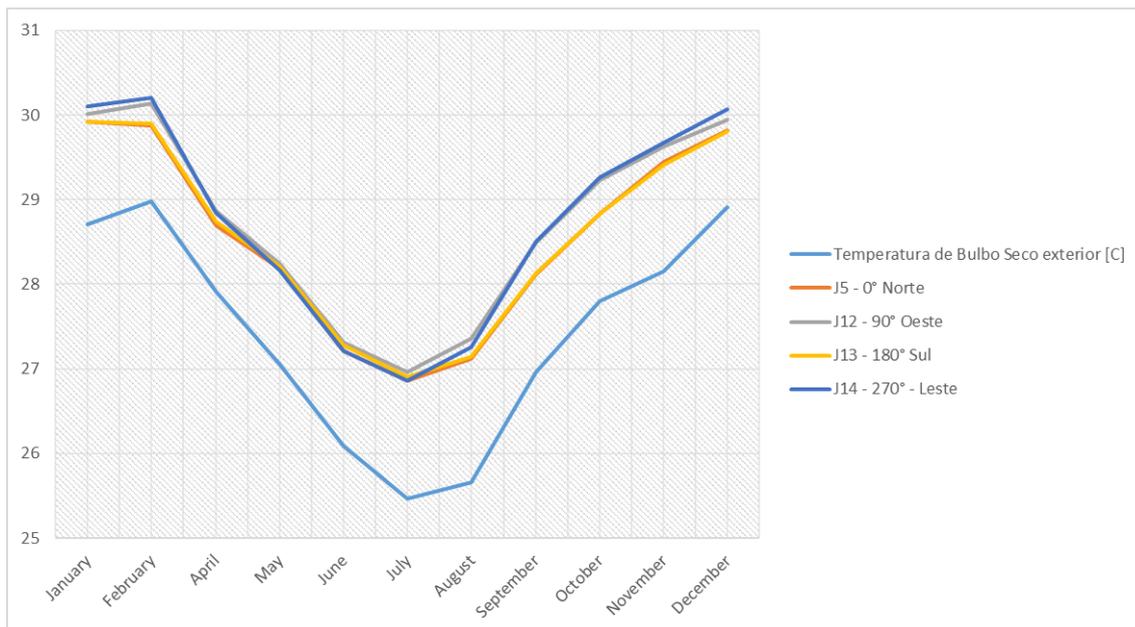
Gráfico 8 - Comparação de Temperaturas das Zonas 2 para diferentes orientações



Para a Zona 3, que não é uma zona condicionada artificialmente, pode ser observado no Gráfico 9 que as variações de temperatura entre simulação que apresentou maiores temperaturas médias, que foi o modelo com rotação de 270° (fachada principal voltada para o lado leste), e a simulação que apresentou menor temperatura, que foi o modelo com rotação de 180° (fachada principal voltada para o lado sul); estes modelos apresentaram uma variação de 0,23°C.

Já o indicador grau-hora ilustrou como piores resultados o modelo com rotação de 270°, tendo um total de 18.430 graus-hora, enquanto que para as simulações que consideraram as rotações 180° obtivemos 16.563 graus-hora, o que representa 10,13% de diferença.

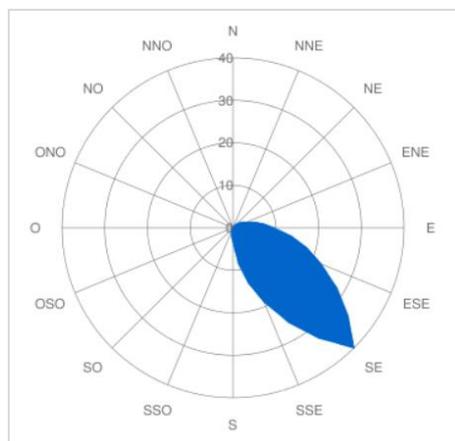
Gráfico 9 - Comparação de Temperaturas das Zonas 3 para diferentes orientações



Desta forma, podemos observar que as orientações que obtiveram os piores resultados para ambas as zonas, no que se refere as temperaturas operativas internas foram as posições com a edificação voltada para leste e oeste, 90° e 270° respectivamente. De forma semelhante, segundo o indicador grau hora a pior posição de locação seria voltada para 270°, para as zonas e 1 e 3 (áreas de maior permanência, e por tanto mais relevantes).

Isto se deve ao fato da edificação ser bastante longilínea, com uma dimensão bastante superior a outra; e quando a edificação está voltada para essas duas posições (90° e 270°) onde a trajetória do sol, leste para oeste, coincide com o maior lado da edificação exposto ao sol, fazendo com que esta receba mais calor ao longo do dia o que se reflete nos gráficos mostrados acima. Outro fator relevante é a condição de vento para a região a qual se aplica o caso de estudo, pois no momento em que fazemos a rotação modelo sua condição de vento é alterada. A distribuição de ventos ao longo do ano pode ser apreciada na Figura 36.

Figura 36 - Direção dos Ventos para a Cidade de Recife



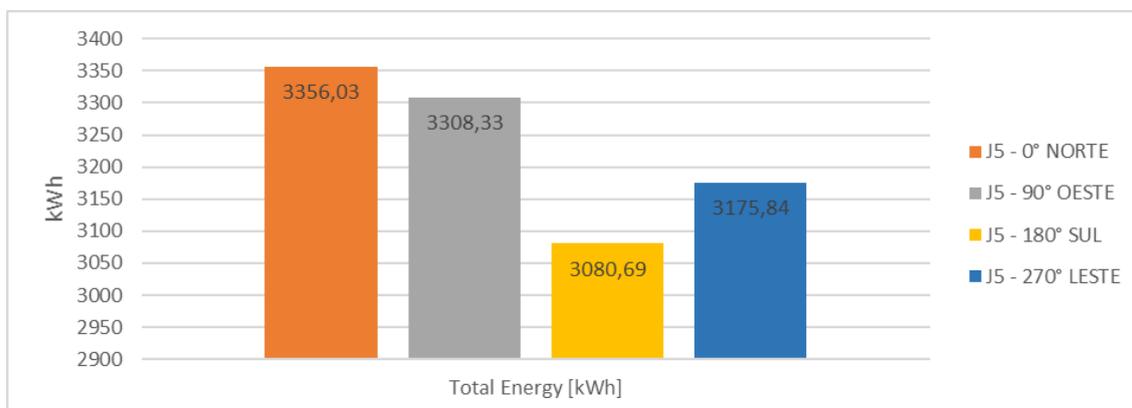
Fonte: <http://pt.wisuki.com/statistics/8089/recife>

E, portanto, apesar de ambos os modelos terem áreas de exposição ao sol equivalentes ao longo, o modelo com a fachada principal voltada para oeste (90°) possui em sua fachada oposta voltada para leste, fachada na qual estão concentradas a maior parte das janelas da edificação. E como pode ser visto na Figura 36, a origem dos ventos para a região se dá de sudeste para noroeste. O que significa que apesar de ter uma área de exposição equivalente o modelo voltado para oeste (90°) tem temperaturas menores que o modelo com fachada principal voltada para leste (270°) por ter uma melhor condição de ventilação.

No que se refere ao indicador grau hora, indicador de desempenho térmico, o que vemos com relação as temperaturas se repete, pois, o indicador grau hora para a simulação com a fachada principal voltada para leste (270°), é cerca de 9,89% superior à simulação com fachada principal para norte, e cerca de 7,33% superior que modelo com fachada para sul, e 4,73% com superior que o modelo com a fachada principal voltada para oeste.

Já com relação ao consumo energético para esta etapa da avaliação, é possível observar no Gráfico 10, que os valores máximos de consumo energético total anual foram de 3.356 kWh para o modelo com rotação de 0° (fachada principal voltada para o norte), enquanto que para o modelo com rotação de 180° (fachada principal voltada para o sul), obtiveram um consumo total de 3.081 kWh, o que representa uma redução do consumo anual de 8,20%.

Gráfico 10 - Consumo Anual de Energia para Diferentes Orientações



Conforme dito na sessão anterior, o consumo energético se difere apenas pelo consumo do condicionamento de ar, visto que as rotinas de ocupação e de uso de equipamentos são constantes, e, apenas, o ar condicionado é variável. Portanto, as variações de temperaturas da zona 1 devem ser analisadas com muito mais critério, quando pretende-se analisar o consumo energético da edificação do caso de estudo.

Assim, analisando o Gráfico 6, as temperaturas operativas internas da Zona 1, são maiores para o modelo com a fachada principal voltada para leste (270°), simulação com maior área de exposição sol ao longo do dia, se equiparando ao modelo voltado para oeste(90°). É de se esperar que o consumo referente à simulação fosse maior devido à explicação dada acima. Entretanto, a variação do consumo foi muito pequena (como pode ser visto no Gráfico 10), cerca de

8,20%, o que mostra que a variação na orientação da edificação no caso de estudo se impactou muito mais no conforto térmico interno da edificação do que no seu consumo energético.

Quando consideradas as taxas aplicadas pela concessionária às residências, na região, de R\$ 0,68 por kWh, podemos observar que a diferença anual seria da ordem R\$189,11, o que seria pouco relevante, mas ao longo de 25 anos de vida útil poderíamos reduzir até R\$4.727,71.

4 CONCLUSÕES

A presente dissertação apresentou uma série de avaliações de desempenho térmico de uma edificação modelo na cidade do Recife/PE – Brasil, através de simulações computacionais realizadas com o software Energyplus. Nestas foram avaliados diversos tipos de vedação da envoltória e a alteração da orientação da locação da edificação. Os resultados da avaliação permitiram identificar as seguintes conclusões:

- As temperaturas médias mensais não têm uma variação significativa independente do material de vedação adotado ou sua orientação, variando valores inferiores a $0,3^{\circ}\text{C}$ nas médias mensais, o que se deve a baixa amplitude térmica da região;
- É possível notar uma variação relevante no indicador grau hora da ordem de até 24,91% (Tabela 5), para a alteração de materiais de envoltória e 13,93% (Tabela 6) para alteração da locação da edificação no terreno;
- As orientações da edificação com a fachada principal voltada para leste e Oeste, tiveram os piores resultados para o indicador grau hora. O que se deve a uma maior área de exposição (devido ao formato da edificação); Entretanto a Orientação leste possui menor ventilação (Menor quantidade de aberturas) que elevam sua temperatura;
- Já para redução do consumo é possível termos, para o caso em análise, uma redução de 23,71% (Gráfico 5), fazendo a correta escolha do material de vedação da envoltória adequado para cada situação. Enquanto que fazendo uma análise correta da posição da locação da edificação é possível reduzir o consumo em até 8,20% (Gráfico 10).
- É importante ainda salientar que essas e muitas outras medidas podem ser combinadas aumentando as reduções de consumo de energia e melhoria de conforto térmico para os usuários.

Com base nos resultados aqui ilustrados, acredita-se, agora, que o conhecimento sobre o tema está mais palpável, e que atingiu-se a meta de mostrar que investir cada vez mais esforços nesta área de conhecimento, com o intuito de aprimorar o desempenho das edificações, pode trazer benefícios concretos e mensuráveis para a construção civil, melhorando as condições conforto dos usuários e reduzindo os custos com consumo de energia. Já que, se realizada uma simulação prévia de uma edificação, ainda na fase de projeto, a economia devido à redução do consumo energético poderia chegar até R\$15.790,10 ao longo da vida útil (25 anos) da edificação.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se pesquisas as quais considerem medição em edificações reais em comparação com simulações termo energéticas realizadas, com o intuito de validação os resultados obtidos através do método numérico teórico.

Propõe-se ainda, a análise da interferência da consideração de um único perfil transversal na entrada de materiais do Energyplus ou a utilização de camadas equivalentes para as vedações, conforme sugerido pela NBR 15220.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.S.S.; GHISI, E. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**, UFSC, Florianópolis, 2014.

ARAÚJO, V. M. D. D. **Parâmetros de Conforto Térmico para Usários de Edificações Escolares no Litoral Nordeste Brasileiro: o caso de Natal-RN**. 1996, 179p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

ASHRAE, **ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1: Desempenho Térmico de Edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro. 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575: Edifícios habitacionais**. Rio de Janeiro. 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4: Edifícios habitacionais - Desempenho Parte 4 : sistemas de vedações verticais externas e internas**. Rio de Janeiro. 2013b. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-5: Edifícios habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas**. Rio de Janeiro. 2013c.

BERTO, R. M. V. S; NAKANO, D. **Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, São Paulo. 2014.

DUARTE, V. C. P.; LAMBERTS, R. **Comparação do desempenho energético de sistemas de climatização para uma edificação comercial em Florianópolis/ SC**, UFSC, Florianópolis, 2014.

EVANS, J. M. **The Comfort Triangles: a new tool for bioclimatic design**. 2007. 315p. Thesis (Technische Universiteit Delft). London, 2007.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**, Rio de Janeiro, 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de Energia – PNE 2030**, Brasília, 2007.

ISO. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**, Geneva, 2005.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A.; ASSIS, E. S. **Análise de sensibilidade por meio de experimento fatorial de parâmetros de desempenho térmico de**

envoltórias de edificações residenciais: contribuição à revisão das normas brasileiras, UFOP, Ouro Preto, 2016.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5 edição. ed. São Paulo: Studio nobel, 2001.

GIVONI, B. Man, **Climate and Architecture**. 2 ed. ed. Londres: Elsevier, 1976. 483 p.

LAMBERTS, R. [et al.]. **Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético**, UFSC/LabEEE, Florianópolis, 2010.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de Residências em florianópolis utilizando a ventilação Natural**, UFSC, Florianópolis, 2007.

NICOL, J. F. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics**. **Energy and Buildings**, v. 36. 2004. p. 628-637

SOUZA, F.; BEYER, P. O. **Simulação visando eficiência energética de um prédio da UFRGS utilizando o energyplus**, UFRGS, Porto Alegre. 2010.