



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Proposta de edificação experimental com
balanço energético nulo para a Universidade
de Brasília**

Por,
Geraldo Souza Pithon Pinto

Brasília, 27 de Junho de 2014.



UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Proposta de edificação experimental com
balanço energético nulo para a Universidade
de Brasília**

POR,

Geraldo Souza Pithon Pinto Matrícula: 09/0025270

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM (Orientador) _____

Prof. Armando Azevedo Caldeira Pires, UnB/ ENM _____

Prof. Mario Olavo Magno de Carvalho, UnB/ ENM _____

Prof. Cláudia Naves David Amorim, UnB / FAU _____

Brasília, 27 de Junho de 2014.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus e ao meu guia espiritual pelo apoio incondicional.

À minha família pela tolerância, apoio e auxílio.

Ao meu orientador, João Pimenta, pelo apoio, dedicação, compreensão e motivação nessa e nas outras atividades em que me orientou.

Aos revisores, tradutores e conselheiros ao longo dessa atividade: Geraldo Pinto, Giovanni Capuzzo e Susi Lopes.

Aos amigos e mestres do Porto, que participaram e me apoiaram no início inconsciente desse trabalho: Gino Colherinhas, Tássio Linhares, Wellington Nascimento, Evandro Costa, Karla, José, Ivo, Professor José Luis Alexandre e Professor Eduardo Fernandes.

Ao amigo do plano espiritual Frederico Régis Silva, um agradecimento e uma homenagem para um grande amigo que partiu para uma nova vida, mas que muito contribuiu para esse trabalho e para a minha vida.

Geraldo Pithon

RESUMO

O presente trabalho apresenta a proposta de uma edificação experimental com balanço energético nulo (*net Zero Energy Building – nZEB*) a ser erguida na Universidade de Brasília. Para cumprir com o balanço nulo, o edifício deverá ter o seu consumo de energia integralmente balanceado pela sua produção ao fim de um ano.

Nessa primeira fase da proposta, o balanço foi verificado por meio de simulações computacionais que calcularam o consumo de energia e a capacidade de produção para um ano típico com as condições climáticas do local. Caso a construção venha a ser concretizada, o balanço deverá ser validado por meio das análises no medidor de energia elétrica do edifício.

O prédio deverá servir como plataforma experimental de pesquisa para áreas tecnológicas da Universidade, proporcionando o aprimoramento de tecnologias de consumo sustentáveis junto à geração de energia por fontes renováveis, apesar de também cumprir com a sua função de ambiente para as atividades acadêmicas convencionais.

O trabalho inicia-se com uma apresentação da justificativa para o tema e uma revisão da bibliografia relevante. A proposta arquitetônica é então apresentada e as condições climáticas locais analisadas. Após abordagem inicial, o estudo passa a enfatizar as questões energéticas do edifício.

Propõe-se a utilização de dois sistemas de climatização: um baseado no ciclo de compressão a vapor com expansão indireta; e outro baseado na combinação do resfriamento evaporativo, resfriamento geotérmico e otimização da ventilação por meio de uma chaminé térmica. As soluções de climatização são analisadas juntamente com o impacto no conforto térmico e no consumo de energia.

A análise energética do edifício foi realizada em programa computacional de referência mundial, o *EnergyPlus*, que avalia conforto, carga térmica e consumo de energia. Um processo de otimização é realizado, resultando numa envoltória de melhor desempenho térmico que demandará menor potência dos sistemas de climatização. Após o processo de otimização, o consumo do edifício foi estimado em 159,18 MWh/ano. Considerando a área total do edifício, esse consumo representa uma taxa de 174,73 MJ/m².ano (48,54 kWh/m².ano).

A produção de energia foi abordada com base nos sistemas fotovoltaicos de conversão de energia solar em elétrica. A capacidade produtiva do sistema foi estimada em 196,55 MWh/ano por meio do software *System Advisor Model*.

Dessa maneira, o balanço entre o consumo e a produção de energia no edifício apontaram para uma superação de 23,14% na meta do balanço energético nulo. Esse resultado é consequência principalmente do baixo consumo energético do edifício alcançado com medidas de otimização do comportamento térmico e lumínico do prédio.

ABSTRACT

This document proposes the development of an experimental net zero energy building (nZEB) to be built at the University of Brasília. To comply with the zero balance, the building must have its energy consumption entirely balanced by its production after one year.

In the first phase of the project, the balance was checked through computer simulations that calculated the energy consumption and the production capacity for one year with the typical climatic conditions of the place. If the construction becomes a reality, the balance should be validated through analysis in the power meter of the building.

The building is supposed to serve as an experimental platform of research for technological areas of the University, providing the improvement of sustainable energy technologies together with the generation of energy from renewable sources, besides fulfilling its function of being an environment for academic activities.

The paper begins with the presentation of the rationale for the topic and a review of the relevant literature. The architectural proposal is then presented and the local climatic conditions analyzed. After the initial approach, the study goes on to emphasize the thermal and energy issues of the building.

Two HVAC solutions are proposed: One of them based on the vapor compression cycle with indirect expansion; and another one based on the combination of evaporative cooling, geothermal cooling and ventilation optimization by means of a thermal chimney. The HVAC solutions are analyzed together with the impact on the thermal comfort and on energy consumption.

Then, the building is assessed in a computer program of energetic simulation, the *EnergyPlus*. An optimization process is performed, resulting in an envelope of better thermal performance that will require lower power of the HVAC systems. After the optimization process, the building consumption due to demand for lighting, equipment and HVAC systems was estimated at 159.18 MWh/year. Considering the total area of the building, this consumption represents a rate of 174.73 MJ/m².year (48.54 kWh/m².year).

Energy production was addressed based on photovoltaic energy conversion systems, turning solar into electric energy. The productive capacity of the system was estimated at 196.55 MWh/year through the *System AdvisorModel* software.

Thus, the balance between consumption and production of energy in the building pointed to an overrun of 23.14% towards the goal of zero energy balance. This result is mainly a consequence of the low energy consumption of the building achieved through optimization measures of luminal and thermal behavior of the building.

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	viii
Lista de tabelas	x
1 Introdução.....	1
1.1 O tema em estudo e sua relevância.....	1
1.2 Objetivos	8
1.3 Metodologia.....	9
1.4 Estrutura do trabalho	9
2 Revisão bibliográfica.....	11
2.1 Edificações à luz do nZEB.....	11
2.2 Poço Provençal	16
2.3 Chaminé Térmica	21
3 Localização, clima e proposta arquitetônica	24
3.1 Localização	24
3.2 Condições climáticas locais.....	25
3.3 Proposta arquitetônica.....	27
4 Sistemas de climatização.....	30
4.1 Água gelada	30
4.2 Resfriamento evaporativo.....	35
4.3 Poço Provençal	38
4.3.1 Modelagem do comportamento térmico do solo.....	40
4.3.2 Modelagem matemática da transferência de calor entre o solo e o ar	41
4.3.3 Análise do poço provençal por meio do <i>EnergyPlus</i>	47
4.4 Chaminé Térmica	49
5 Simulações Térmicas	54
5.1 O software de análise.....	54
5.2 Objetivo	55
5.3 Metodologia.....	55
5.4 Modelagem e configuração do <i>EnergyPlus</i>	56
5.4.1 Arquivo Climático.....	56
5.4.2 Envoltória, Sombreamentos e Divisões Internas	57
5.4.3 Ventilação natural	59
5.4.4 Chaminé Térmica	59
5.4.5 Características construtivas.....	60
5.4.6 Tipos de espaços e cargas internas	63
5.5 Simulação térmica em evolução livre	70
5.5.1 Conforto térmico	70
5.5.2 Resultados.....	70
5.5.3 Análise dos resultados.....	79
5.6 Simulação de carga térmica	80
5.6.1 Definição do limite de temperatura	80
5.6.2 Resultados.....	81
5.7 Análise dos resultados	90
5.8 Otimização térmica do edifício	90
5.8.1 Envidraçados	91
5.8.2 Composição das paredes	92
5.8.3 Alteração da composição da cobertura	96
5.8.4 Inclusão de sombreamento sobre a cobertura	97
5.8.5 Edifício final otimizado	98
6 Análise energética	105
6.1 Consumo de energia	105
6.2 Geração de energia.....	107
6.2.1 Simulação de produção de energia	109
6.2.2 Resultado da simulação de geração de energia.....	112
6.3 Balanço de energia.....	112
7 CONCLUSÃO	114
8 Referências Bibliográficas	115
9 ANEXOS	119

9.1	ANEXO - Dados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares (Neves, 2012).....	I
9.2	ANEXO - Simulação Térmica Preliminar de Geometrias Hipotéticas	III
9.2.1	Modelagem da envoltória	III
9.2.2	Tipo de espaço, zonas térmicas e arquivo climático.....	III
9.2.3	Resultados.....	IV
9.2.4	Análise dos resultados.....	VII
9.3	ANEXO – Diretrizes para iluminação eficiente	IX
9.3.1	Prateleiras de luz na janelas.....	IX
9.3.2	Iluminação zenital	IX
9.3.3	Iluminação artificial	X
9.4	ANEXO - Programa “Chaminé 1.0”	XIII
9.5	ANEXO – Plantas baixas apresentadas pela proposta arquitetônica	XIV
9.6	ANEXO – Catálogo do Paineis Fotovoltaico	XVII
9.7	ANEXO – Arquivos digitais	XIX

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: OFERTA DE ENERGIA INTERNA TOTAL NO BRASIL EM 2012 (BRASIL, 2013(A))	3
FIGURA 2: OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2012 (BRASIL, 2013(A))	4
FIGURA 3: CONSUMO TOTAL DE ENERGIA NO BRASIL EM 2012 (BRASIL, 2013(B))	5
FIGURA 4: CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2012 (BRASIL, 2013(B))	5
FIGURA 5: CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA CORRESPONDENTE AOS EDIFÍCIOS NO BRASIL EM 2012 (BRASIL, 2013(B))	6
FIGURA 6: USINA DE TUCURUÍ NO RIO TOCANTINS (ELETRONORTE, 2013).....	6
FIGURA 7: IMAGEM DE SATÉLITE DO CAMPUS DARCY RIBEIRO COM INDICAÇÃO DO LOCAL SUGERIDO PARA CONSTRUÇÃO DO EDIFÍCIO NZEB.....	24
FIGURA 8: MÉDIA DIÁRIA DAS TEMPERATURAS DE BULBO SECO DE BRASÍLIA	25
FIGURA 9: PERFIL ANUAL DA MÉDIA DIÁRIA DE INTENSIDADE DOS VENTOS.....	26
FIGURA 10: GEOMETRIAS PRELIMINARES DISPONIBILIZADAS PELA EQUIPE DA ARQUITETURA	28
FIGURA 11: MODELO ARQUITETÔNICO TRIDIMENSIONAL DO EDIFÍCIO NZEB (BIRCK, 2014)	29
FIGURA 12: SISTEMA DE REFRIGERAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA MODELADO NO <i>OPENSTUDIO</i>	32
FIGURA 13: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR MODELADO NO <i>OPENSTUDIO</i>	34
FIGURA 14: PROCESSO PSICROMÉTRICO DO AR AO PASSAR PELO MÓDULO EVAPORATIVO	35
FIGURA 15: MODELAGEM DO SISTEMA EVAPORATIVO NO <i>OPENSTUDIO</i>	36
FIGURA 16: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DO LABORATÓRIO NO DIA DE PROJETO COM E SEM A CLIMATIZAÇÃO EVAPORATIVA	37
FIGURA 17: PERFIL ANUAL DO PMV PARA O LABORATÓRIO DO SEGUNDO PISO COM CLIMATIZAÇÃO EVAPORATIVA.....	38
FIGURA 18: PERFIL DO PMV PARA O LABORATÓRIO SEGUNDO PISO COM E SEM CLIMATIZAÇÃO EVAPORATIVA	38
FIGURA 19: DESENHO ESQUEMÁTICO DE POÇO CANADIANO EM EDIFICAÇÃO	39
FIGURA 20: INTERFACE DO <i>ENERGYPLUS</i> PARA USO DO <i>CALCSOILSURFTEMP</i>	41
FIGURA 21: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DUTO COM AS TEMPERATURAS DE ENTRADA, SAÍDA E DA PAREDE	43
FIGURA 22: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DUTO EM CORTE E CAMADA DE EXTERIOR DE TERRA	44
FIGURA 23: CONFIGURAÇÃO DO POÇO PROVENÇAL NO <i>ENERGYPLUS</i>	48
FIGURA 24: COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO AR EXTERIOR E TEMPERATURA DO AR APÓS PASSAR PELO POÇO PROVENÇAL.....	48
FIGURA 25: VISTAS EM CORTE DE DUAS CHAMINÉS TÉRMICAS (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2013) E (NEVES, 2012).....	49
FIGURA 26: CORTE ESQUEMÁTICO DE EDIFICAÇÃO COM CHAMINÉ TÉRMICA E POÇO CANADIANO.....	50
FIGURA 27: MODELO DE CHAMINÉ TÉRMICA ANALISADO PELO PROGRAMA CHAMINÉ 1.0.....	51
FIGURA 28: PROGRAMA CHAMINÉ	52
FIGURA 29: ENVOLTÓRIA MODELADA DAS GEOMETRIAS A, B E C NO <i>GOOGLE SKETCHUP</i>	57
FIGURA 30: MODELO APRESENTADO PELA EQUIPE DO PROJETO ARQUITETÔNICO	58
FIGURA 31: MODELO NO <i>OPENSTUDIO</i>	58
FIGURA 32: MODELO LIDO PELO <i>ENERGYPLUS</i>	58
FIGURA 33: ESQUEMA DE MODELAGEM DA VENTILAÇÃO NATURAL NO <i>ENERGYPLUS</i> (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).....	59
FIGURA 34: MODELAGEM DA ENVOLTÓRIA DA CHAMINÉ TÉRMICA	60
FIGURA 35: PAREDE BÁSICA UTILIZADA INICIALMENTE.....	61
FIGURA 36: CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA COM A OTIMIZAÇÃO DAS JANELAS.....	92
FIGURA 37: ALTERAÇÃO DA CARGA TÉRMICA COM A MODIFICAÇÃO DAS JANELAS	92
FIGURA 38: CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA COM A ALTERAÇÃO DAS PAREDES.....	95
FIGURA 39: CARGA TÉRMICA CONFORME A ALTERAÇÃO DAS PAREDES.....	95
FIGURA 40: CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA COM A ALTERAÇÃO DA COBERTURA	97
FIGURA 41: CARGA TÉRMICA COM A ALTERAÇÃO DA COBERTURA	97
FIGURA 42: CONSUMO DE ENERGIA COM SOMBREAMENTO SOBRE A COBERTURA.....	98
FIGURA 43: CARGA TÉRMICA COM SOMBREAMENTO SOBRE A COBERTURA.....	98
FIGURA 44: MODELO TÉRMICO FINAL DE SIMULAÇÃO APÓS AS OTIMIZAÇÕES	99
FIGURA 45: EVOLUÇÃO NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA PARA O EDIFÍCIO OTIMIZADO ...	101
FIGURA 46: EVOLUÇÃO NA REDUÇÃO DE CARGA TÉRMICA PARA O MODELO OTIMIZADO	102

FIGURA 47: PMV PARA OS AMBIENTES DE REFERÊNCIA NO DIA DE PROJETO	102
FIGURA 48: PMV PARA AMBIENTES EM DESCONFORTO	103
FIGURA 49: MODIFICAÇÃO NA CARGA TÉRMICA EM VIRTUDE DO AJUSTE DOS TERMOSTATOS PARA AS CONDIÇÕES DE CONFORTO	104
FIGURA 50: PERFIL DO PMV PARA OS AMBIENTES CRÍTICOS COM TERMOSTATOS REGULADOS PARA 20,5°C.	104
FIGURA 51: CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE	106
FIGURA 52: SELEÇÃO DE SISTEMA NO SAM	109
FIGURA 53: CONFIGURAÇÃO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS	110
FIGURA 54: CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO PAINEL FOTOVOLTAICO E DA INSTALAÇÃO	111
FIGURA 55: TELA DE RESULTADOS DO SAM.....	111
FIGURA 56: PRODUÇÃO MENSAL DE ENERGIA PELO SISTEMA FOTOVOLTAICO	112
FIGURA 57: BALANÇO DE ENERGIA DO EDIFÍCIO NZEB.....	113
FIGURA 58: ENVOLTÓRIA MODELADA DAS GEOMETRIAS A, B E C NO <i>GOOGLE SKETCHUP</i>	III
FIGURA 59: TEMPERATURA DO AR PARA A GEOMETRIA A EM EVOLUÇÃO LIVRE	IV
FIGURA 60: TEMPERATURA DO AR PARA A GEOMETRIA B EM EVOLUÇÃO LIVRE	V
FIGURA 61: TEMPERATURA DO AR PARA A GEOMETRIA C EM EVOLUÇÃO LIVRE.....	V
FIGURA 62: CARGA SENSÍVEL DA GEOMETRIA A AO LONGO DE UM ANO	VI
FIGURA 63: CARGA SENSÍVEL DA GEOMETRIA B AO LONGO DE UM ANO	VI
FIGURA 64: CARGA SENSÍVEL DA GEOMETRIA C AO LONGO DE UM ANO	VII
FIGURA 65: ILUMINAÇÃO ZENITAL EM RESTAURANTE GERO RJ (RESTAURANTE DO GRUPO FASANO)	X

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PLANO DE NECESSIDADES DESENVOLVIDO ELABORADO PELA FAU.....	28
TABELA 2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO <i>CHILLER</i> PARA AS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA	31
TABELA 3: SIMBOLOGIA UTILIZADA PELO <i>OPENSTUDIO</i> PARA O SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA.....	33
TABELA 4: CONFIGURAÇÃO DOS FANCOILS	33
TABELA 5: SIMBOLOGIA UTILIZADA PELO <i>OPENSTUDIO</i> PARA O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR	34
TABELA 6: SIMBOLOGIA UTILIZADA PELO <i>OPENSTUDIO</i> PARA O SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO EVAPORATIVA....	36
TABELA 7: CORRELAÇÕES DO NÚMERO DE <i>NUSSELT</i> PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS (FERNANDES, ET AL., 2008).....	44
TABELA 8: CONDUTIBILIDADES TÉRMICAS MÉDIAS DE ALGUNS MATERIAIS.....	45
TABELA 9: PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO PARA POÇOS CANADIANOS	47
TABELA 10: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA PAREDE.....	61
TABELA 11: PROPRIEDADES DOS ENVIDRAÇADOS.....	62
TABELA 12: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DA COBERTURA	62
TABELA 13: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DOS PISOS.....	62
TABELA 14: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTE DA CHAMINÉ TÉRMICA	63
TABELA 15: PROPRIEDADES DOS NOVOS ENVIDRAÇADOS.....	91
TABELA 16: PROPRIEDADES DAS PAREDES COM O AUMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA.....	93
TABELA 17: PROPRIEDADES DAS PAREDES COM AUMENTO COM AUMENTO DE MASSA	93
TABELA 18: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA PAREDE.....	94
TABELA 19: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DA NOVA COBERTURA.....	96
TABELA 20: PROPRIEDADES DAS PAREDES OTIMIZADAS.....	100
TABELA 21: PROPRIEDADES DOS VIDROS UTILIZADOS NAS JANELAS OTIMIZADAS	100
TABELA 22: PROPRIEDADES DA COBERTURA OTIMIZADA	100
TABELA 23: PROPRIEDADES DOS PISOS	101
TABELA 24: CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE.....	106
TABELA 25: CONSUMO DE ENERGIA POR ÁREA DE DIVERSOS EDIFÍCIOS.....	107
TABELA 26: ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL FOTOVOLTAICO	108
TABELA 27: COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS E CARGAS MÁXIMAS PARA CADA GEOMETRIA E ENERGIA CONSUMIDA EM UM ANO.....	VII

1 INTRODUÇÃO

Desenvolve-se aqui a introdução ao tema desse projeto, a abordagem da sua relevância, a descrição dos objetivos, a metodologia e a estrutura desse trabalho.

1.1 O tema em estudo e sua relevância

O presente trabalho aborda a proposta de um edifício que alcance a excelência em eficiência energética, ou seja baixo consumo e máxima produção de energia por meio das fontes renováveis ali disponíveis.

Pretende-se, com isso, alcançar o “Balanço de Energia Nulo”, enquadrando o edifício no conceito de *net Zero Energy Building* e assim cumprir com o seu papel de sustentabilidade energética.

Quando definido como meta da construção, o ideal *nZEB* passa a dar o rumo às decisões do projeto já no momento da concepção arquitetônica, porquanto a formulação deve prever soluções sustentáveis de climatização, iluminação, uso e construção do edifício.

Posteriormente, as equipes responsáveis pelos projetos arquitetônico, civil, mecânico, elétrico e de automação a serem implementados, devem trabalhar de forma multidisciplinar, desenvolvendo suas alternativas com o foco voltado para a máxima eficiência energética. Por fim, o edifício deve passar por diversas simulações computacionais para ser otimizado até atingir as melhores condições de projeto.

A motivação para a construção de *nZEBs* advém do fato de que os edifícios são responsáveis por grande parte do consumo total de energia em um país. Dessa maneira, o grande consumo por parte dos edifícios aliado a escassez das fontes não renováveis direcionam as medidas governamentais para a redução da demanda e a produção por fontes renováveis de energia.

Construções *nZEB* têm sido objeto de estudo em diversos locais do mundo, notadamente em instituições de referência em ensino.

A justificativa para tamanha atenção ao melhor aproveitamento da energia consumida em edifícios é fruto de uma evolução histórica em torno de como o homem tem feito uso dos recursos naturais para o desenvolvimento das nações.

O desenvolvimento das alternativas de aumento de eficiência torna-se urgente visto que as dificuldades energéticas se agravam rapidamente em alguns países que passam a enfrentar um consumo no limite da sua capacidade produtiva, obrigando a adoção do racionamento para se evitar um colapso no sistema energético. O Brasil passa atualmente por essa situação devido ao baixo nível dos reservatórios hídricos que são responsáveis por abastecer as usinas hidrelétricas. Cenário semelhante foi verificado quando em Julho de 2001 e Setembro de 2002 foram necessários racionamentos energéticos.

As causas desses problemas são atribuídas à escassez de chuvas em locais que abrigavam os reservatórios de usinas hidrelétricas, mas é evidente que a falta de planejamento e investimento no setor energético e em tecnologias mais avançadas de consumo e produção agravam muito a situação.

As dificuldades energéticas a nível mundial resultaram em conferências internacionais por intermédio da Organização das Nações Unidas - ONU. A primeira conferência da ONU acerca do tema aconteceu no ano de 1972, na cidade de Estocolmo, intitulada “Conferência da ONU sobre o Homem e o Meio Ambiente”. Devido ao agravamento das dificuldades energéticas e ambientais, foram realizadas a Cúpula da Terra (Rio 92), a Cúpula Mundial sobre o desenvolvimento sustentável (Rio +10) e a Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável (Rio+20). Fruto desses encontros foram o Relatório de Brundtland, o Protocolo de Montreal, o Protocolo de Kyoto, e a Agenda 21. Esses documentos definiram acordos que regulamentaram diversos assuntos relacionados ao meio ambiente entre os países participantes, dentre os quais podemos destacar as regulamentações da emissão de substâncias que degradam a camada de ozônio e que provocam o efeito estufa e o comprometimento dos países em desenvolver estudos e metas de redução do impacto ambiental.

Impulsionados pelas conferências da ONU, os estudos em busca da eficiência energética aumentaram e passaram a ser mais respeitados e reconhecidos.

É consenso que a solução para a escassez energética passa necessariamente pela conscientização dos usuários quanto ao uso da energia, além do aumento da eficiência dos processos de consumo e da adoção de fontes renováveis. Dessa maneira, espera-se balancear a capacidade produtiva com as necessidades de consumo, buscando ainda a independência do petróleo e uma redução substancial na degradação ambiental.

O Ministério de Minas e Energia tem liderado a implementação de Programas, Projetos e Planos buscando tanto a melhoria da eficiência energética, quanto o aumento do uso de fontes alternativas de energia. Dentre as medidas adotadas pelo ministério, ganha destaque o Plano Nacional de Eficiência Energética que traz um “resumo dos problemas identificados e propostas de soluções para que o potencial de Eficiência Energética em cada uma das áreas seja realizado” (BRASIL, 2010).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou o Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição – PEE, que, entre outras aplicações, “obriga as distribuidoras de energia em aplicar 0,5% de sua receita operacional líquida em ações que tenham por objetivo o combate ao desperdício de energia” (BRASIL, 2010).

A Eletrobras implementou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL que tem por missão “promover a eficiência energética, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população e eficiência dos bens e serviços, reduzindo os impactos ambientais” e que promove então diversos subprogramas de relevância no mercado brasileiro como o Procel Edifica e o Procel Selo, que promovem a classificação e etiquetagem de edificações e produtos, respectivamente.

Organizações não governamentais brasileiras também estão presentes nesse cenário como o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE que tem por objetivo promover o aumento da eficiência na transformação e na utilização de todas as modalidades de energia em benefício da economia, do meio ambiente e da maior segurança quanto ao acesso à energia e bem estar da sociedade.

Nesse contexto de redução do consumo e mudança das fontes de energia, duas análises são primordiais para o local em exame: a matriz energética de produção e o consumo de energia do país.

Matriz Energética é a denominação dada à representação quantitativa do consumo ou produção de energia em um determinado país ou região durante um determinado período de tempo. A Matriz Energética do Brasil é avaliada pelo Ministério de Minas e Energia por meio de quatro documentos:

- Resenha Energética Brasileira e Balanço Energético Nacional: apresentam a matriz energética de consumo e de produção nacional para o ano anterior ao da publicação e diversas análises dos dados;
- Matriz Energética Nacional 2030: “Além de apresentar a matriz energética para os anos de 2005, 2010, 2020 e 2030, este documento fornece ainda uma série de indicadores derivados dos resultados projetados, os quais permitem, por comparação intertemporal e entre países, avaliar melhor a grandeza dos resultados para o Brasil.”
- Boletim Mensal de Energia: traz a Oferta Interna de Energia mensal do país.

A Matriz de Oferta de Energia Interna do Brasil para o ano de 2012 é apresentada na figura a seguir:

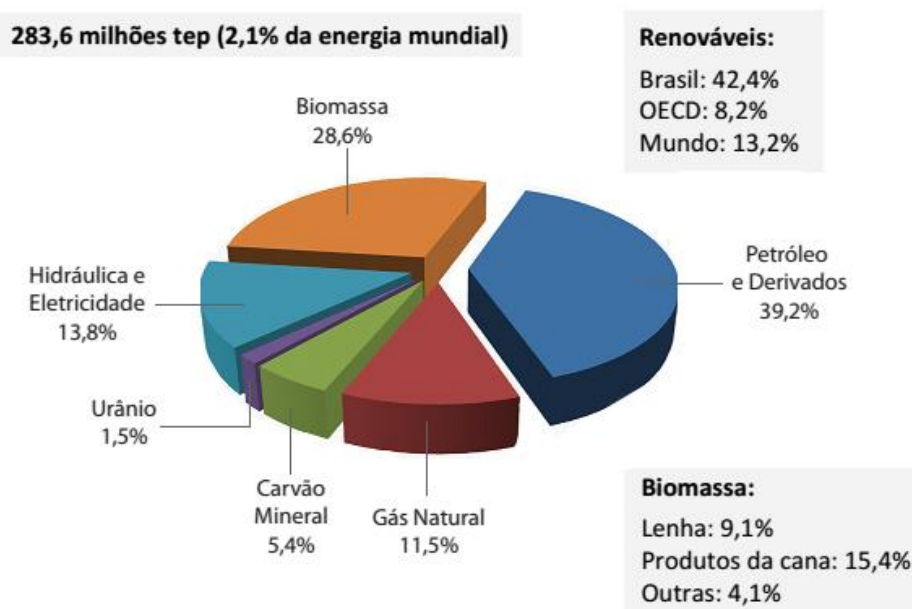


Figura 1: Oferta de Energia Interna total no Brasil em 2012 (BRASIL, 2013(a))

Diante do apresentado, verifica-se a forte dependência ainda exercida pelo petróleo na matriz de oferta. Tal fato se dá porque os dados apresentados não se restringem à oferta de energia elétrica, sendo

essa apenas uma fração do total que recebe contribuição de todas as outras. Diante disso e do grande volume de energia consumida principalmente no setor de transportes, o petróleo se apresenta então como a principal fonte.

Possibilitando uma análise com maior ênfase somente na oferta de energia elétrica, é apresentado também a Oferta Interna de Energia Elétrica – OIEE:

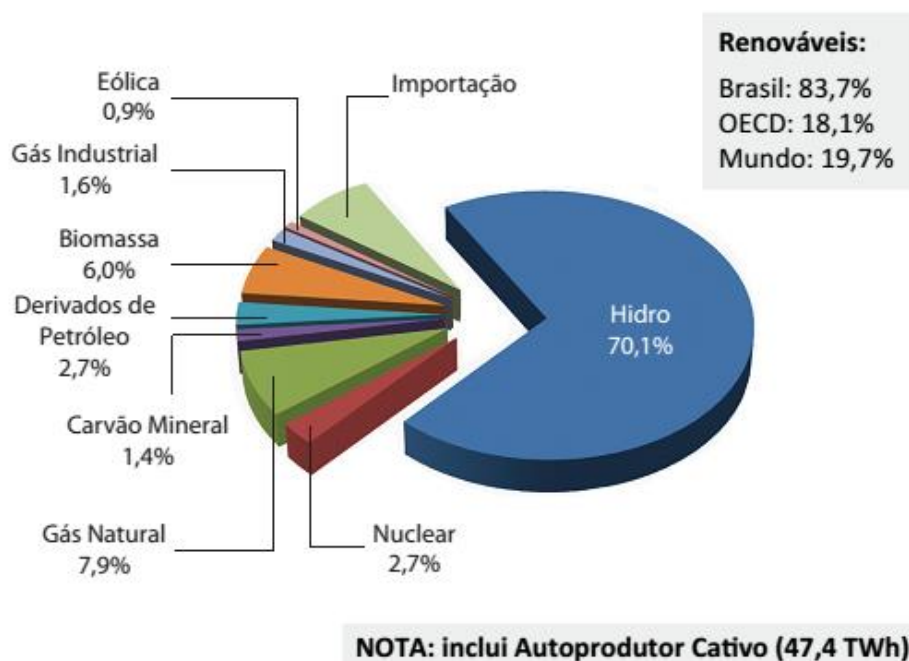


Figura 2: Oferta Interna de Energia Elétrica em 2012 (BRASIL, 2013(a))

Do apresentado, verifica-se a forte contribuição da produção de energia de fontes hidráulicas, colocando o Brasil com vantagens comparativas de 83,7% de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira, contra apenas 18,1% da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e de 19,7% na média mundial, conforme pode ser observado no quadro à direita do gráfico.

A matriz de consumo brasileira para o ano de 2012 pode ser observada nas duas figuras que seguem, sendo a primeira para o consumo de energia total e a segunda o consumo de energia elétrica:

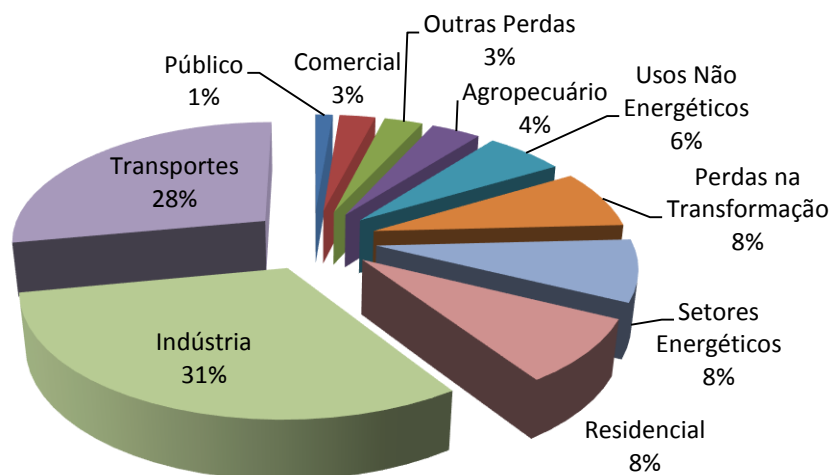


Figura 3: Consumo total de energia no Brasil em 2012 (BRASIL, 2013(b))

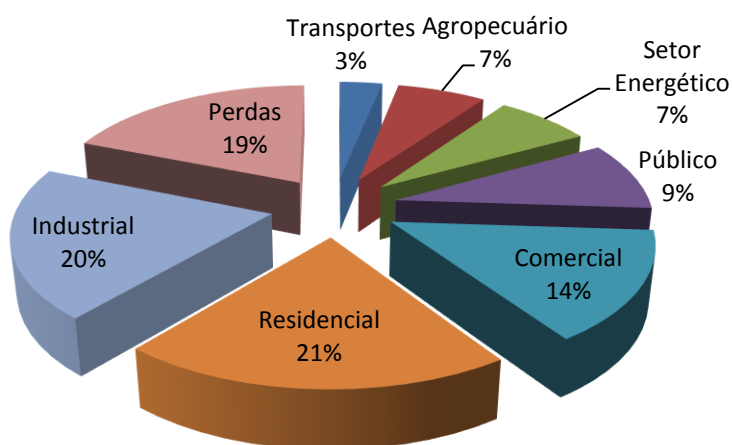


Figura 4: Consumo de Energia Elétrica no Brasil em 2012 (BRASIL, 2013(b))

Diante do apresentado, é possível analisar a relação de cada setor no consumo e oferta de energia do país. Tal análise é de grande interesse no âmbito desse trabalho porque mostra o quanto medidas de aumento de eficiência impactariam na matriz energética, de modo a direcionar as providências a serem adotadas para as áreas de maior impacto.

Será dado foco na produção e consumo de energia elétrica. Analisar-se-á com maior especificidade, o consumo de energia por parte das edificações no intuito de verificar o impacto na matriz energética total e o quanto as medidas de aumento de eficiência poderiam alterar essa matriz.

“No Brasil, o setor das edificações está entre os maiores consumidores de energia elétrica.” (PROCEL). Consta-se que as edificações, que compreendem os setores residencial, comercial e a parcela correspondente aos prédios públicos do setor público, respondem por cerca de 232 TWh, o equivalente a 40% do consumo de energia total no ano de 2012, conforme apresenta a Figura 5: Consumo de energia elétrica correspondente aos edifícios no Brasil em 2012 .

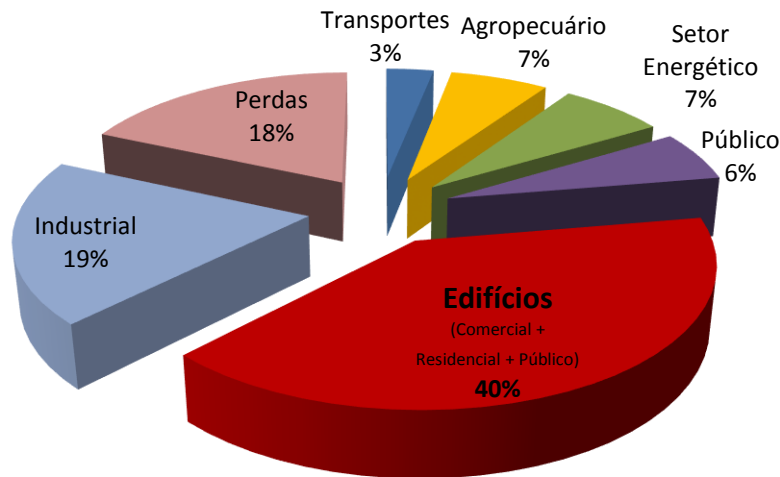


Figura 5: Consumo de energia elétrica correspondente aos edifícios no Brasil em 2012 (BRASIL, 2013(b))

“Estima-se um potencial de redução deste consumo em 50% para novas edificações e de 30% para aquelas que promoverem reformas que contemplem os conceitos de eficiência energética em edificações” (PROCEL Edifica). Importante ressaltar que, as estimativas apresentadas não incluem a possibilidade de produção de energia nos edifícios, à exceção do aproveitamento da energia solar para aquecimento de água. Portanto, tais estimativas poderiam ser ainda muito ampliadas conforme fossem iniciados meios de produção de energia elétrica através de fontes renováveis nos próprios edifícios.

Segundo essa estimativa, seria possível então reduzir em aproximadamente 81 TWh por ano o consumo total de energia elétrica. Essa redução é correspondente a suspender o dobro da produção anual de energia disponibilizada pela usina hidrelétrica de Tucuruí, a maior usina totalmente brasileira.

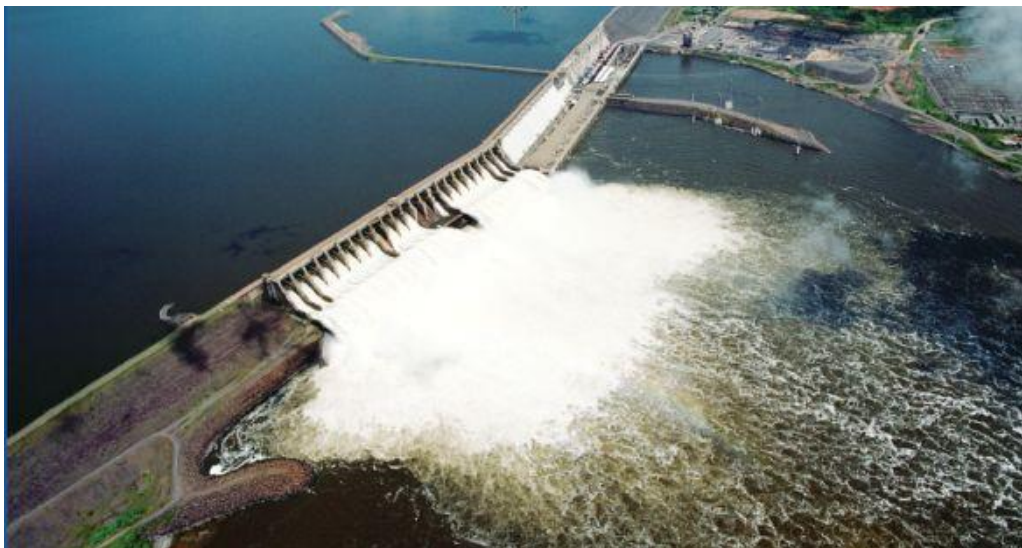


Figura 6: Usina de Tucuruí no Rio Tocantins (Eletronorte, 2013)

Por conseguinte, fica evidenciado que uma alteração no modo de construção atualmente adotado no Brasil junto às reformas para os edifícios já construídos teria um impacto considerável no consumo de energia nacional, o que eleva a importância do tema tratado e destaca a necessidade de pesquisas em áreas que possibilitem um aumento cada vez maior da eficiência energética em edificações.

Diante disso, urge a necessidade de incentivar os estudos acerca do comportamento termoenergético dos edifícios. A pesquisa nessa área exige a compreensão do método de projeto dos prédios, bem como de suas funções.

As edificações possuem a função de abrigar o homem propiciando-lhe conforto. O conforto abrange variáveis térmicas, visuais, acústicas e de qualidade do ar. Neste contexto, cabe ao edifício amenizar os climas severos ou proporcionar ambientes tão confortáveis quanto o exterior, em condições climáticas amenas. Antigamente as edificações eram projetadas conforme o clima regional com o fim de manter as condições de conforto mais próximas possíveis do desejado. Com a Revolução Industrial, os projetos arquitetônicos passaram a se padronizar pelo mundo e a adotar sistemas artificiais para reproduzir o conforto. Diante das crises energéticas e ambientais atuais já mencionadas, urge a necessidade de uma remodelagem dos projetos arquitetônicos e dos sistemas artificiais de manutenção do conforto amplamente empregados, visando o aumento da eficiência e redução de consumo de energia.

Perante a relevância de pesquisa na área tratada, as universidades encontram-se na condição de liderar as investigações acerca do tema, desenvolvendo projetos e grupos de pesquisa que se proponham a tratar da produção e do consumo de energia como algo a ser melhorado.

Um passo importante, que as universidades envolvidas no avanço do melhor uso da energia em edificações têm adotado, é o desenvolvimento do projeto e construção de uma edificação que atinja o nível máximo de eficiência possível para as tecnologias atualmente disponíveis, possibilitando que a mesma seja utilizada como laboratório de pesquisa e desenvolvimento de novos projetos. Em casos já implementados, tornou-se possível o enquadramento desses prédios como Edificações de Balanço Energético Nulo - *net Zero Energy Building (nZEB)*, por atingirem a condição de produzirem no mínimo a mesma quantidade de energia que consomem.

Brasília, enquadrada como uma das principais cidades do país pelo seu peso político e sua formação de profissionais em nível de excelência, não possui em sua Universidade uma edificação experimental de alta eficiência. Em virtude de que a Universidade de Brasília (UnB) é instituição líder em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias na região Centro-Oeste, seria de grande valor a elaboração e execução do projeto de uma edificação que atinja níveis elevados de eficiência energética, enquadrando-se como uma *nZEB*.

A edificação seria um importante meio de estudos para diversas áreas da universidade, que possibilitaria o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis, novos conceitos energeticamente

eficientes, a educação e conscientização da população acerca do uso da energia, além de propiciar o uso regular para a qual tenha sido projetada.

Pode-se ressaltar como áreas da universidade que seriam beneficiadas com a concretização do projeto:

- a. Departamento de Engenharia Mecânica: Teria uma excelente ferramenta de estudo quanto ao comportamento térmico de edificações, possibilitando estudos acerca da transferência de calor, comportamento do escoamento do ar, uso de diferentes soluções para o condicionamento do ar, conforto térmico, cálculos de carga térmica precisos e meios de produção de energia.
- b. Departamento de Engenharia Elétrica: Seria beneficiado com uma ferramenta de estudos quanto à geração de energia por meio de fontes renováveis e quanto ao consumo da energia produzida.
- c. Curso de Engenharia Mecatrônica: Poderia realizar estudos sobre a automação de processos envolvendo a otimização dos meios de produção e consumo de energia.
- d. Departamento de Engenharia Civil: O edifício serviria para a pesquisa quanto às estruturas adequadas a serem empregadas em edifícios de alta eficiência energética.
- e. Faculdade de Arquitetura: Teria também uma excelente ferramenta de estudos quanto ao projeto arquitetônico envolvendo uma edificação que otimize ao máximo as soluções passivas de iluminação e conforto térmico dos ocupantes.
- f. Faculdade de Medicina: Poderiam efetuar diversas análises quanto à qualidade do ar interior em edificações e as suas consequências para o corpo humano.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo central propor um edifício experimental à luz do conceito *net Zero Energy Building* para a Universidade de Brasília, com foco na sua análise termoenergética.

Aliado à proposta principal, associam-se como outros objetivos:

- Justificar o emprego e a importância de se ter uma edificação de alta eficiência no contexto energético universitário, regional, nacional e internacional;
- Apresentar uma análise detalhada sobre a condição térmica da edificação, as soluções de climatização a serem empregadas e as características de construção para reduzir a carga térmica;

- Simular o consumo e a produção de energia para a proposta arquitetônica, executando o balanço entre as duas grandezas e verificando a viabilidade técnica do sucesso do ideal nZEB.
- Se possível, apresentar o balanço energético nulo proposto contrapondo consumo e produção de energia.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada inicia-se pelo estudo da relevância do tema, com o objetivo de justificar, ou não, a construção de uma edificação de alta eficiência. Justificada a relevância, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica das obras sobre as edificações *nZEB* existentes e as soluções energéticas por elas adotadas.

Após a revisão bibliográfica, foi estabelecida uma parceria com equipe de arquitetura que trabalhou no desenvolvimento da proposta arquitetônica dentro dos requisitos estudados na revisão bibliográfica. A proposta arquitetônica foi apresentada no Capítulo 3 juntamente com o estudo do clima e da localização.

Analisou-se termicamente o modelo proposto por meio de simulação computacional no *EnergyPlus*, resultando no cálculo da sua carga térmica e na decisão das soluções de climatização a serem implementadas. As soluções de climatização foram estudadas e apresentadas juntamente com as suas características de desempenho.

A análise energética foi introduzida no *EnergyPlus* após se definir as taxas de utilização e os parâmetros de desempenho dos equipamentos e iluminação, resultando num valor anual de consumo de energia elétrica que soma todas as demandas do edifício ao longo das 8760 horas do ano.

A capacidade produção de energia anual foi calculada a partir da área disponível para emprego de painéis fotovoltaicos e dos parâmetros de desempenho desses painéis. A análise foi realizada utilizando o *software System Advisor Model*.

Comparou-se o consumo anual de energia com a produção e verificou-se a viabilidade técnica do balanço energético nulo.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 7 capítulos, incluindo essa introdução e a conclusão, de modo que cada capítulo representa uma etapa do estudo necessário para a proposta final da edificação.

O primeiro capítulo é composto principalmente por uma análise do tema em estudo e sua relevância, de forma a apresentar e justificar para o leitor a importância do tema tratado. O segundo capítulo traz

uma revisão bibliográfica abordando as edificações *nZEB* já construídas e duas soluções de climatização diferenciadas a serem implementadas. O terceiro capítulo apresenta o edifício, com a sua proposta arquitetônica, a análise do clima e do local geográfico. Os sistemas de climatização são abordados no quarto capítulo, juntamente com as suas configurações de desempenho. O quinto capítulo traz uma ampla análise das simulações térmicas realizadas. O balanço energético final é apresentado no sexto capítulo, antecipado pelas análises do consumo e da produção de energia. O sétimo capítulo traz as conclusões do projeto. Os anexos constituem material complementar que apresentam cálculos, diretrizes de eficiência energética, tabelas de referência, catálogos, plantas baixas do edifício e uma descrição dos arquivos computacionais de simulação que fazem parte desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo traz o estado da arte das edificações nZEB e de duas técnicas de climatização passivas: o poço provençal e a chaminé térmica.

2.1 Edificações à luz do nZEB

Os Estados Unidos e alguns países Europeus têm liderado as pesquisas sobre as construções de alta eficiência energética. Diversos projetos foram concretizados com objetivo principal de redução do consumo e aumento da eficiência energética, muitos deles alcançando a meta de edifício *net Zero*. Nesse contexto, ganham destaque alguns empreendimentos, por fazerem uso de soluções diferenciadas, que foram implementadas em outros casos e passaram a fazer parte de uma padronização de construções nZEB.

O Departamento de Energia Americano, por meio do site *Energy Efficiency and Renewable Energy*, traz uma relação das construções nZEB nos EUA, descrevendo as soluções adotadas em cada uma e os resultados obtidos. Três dessas edificações merecem aqui uma abordagem, dada às soluções energéticas empregadas e aos objetivos para que foram desenvolvidas.

Oberlin College Lewis Center está localizada no campus da faculdade e Oberlin em Ohio. Inaugurado em 2000, o edifício abriga salas de aula, escritórios, um auditório, uma pequena biblioteca e um átrio. A construção faz parte de um programa acadêmico com fins experimentais para avaliar a utilização de novas tecnologias energéticas objetivando “ajudar a redefinir a relação entre a humanidade e o meio ambiente”.

O projeto é fruto da própria faculdade, liderada pelo professor Orr que reuniu alunos, professores e membros da comunidade para discutir a ideia e desenvolver as tecnologias a serem implementadas. Na pós-ocupação, O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) tem trabalhado juntamente à universidade para estudar e melhorar o desempenho energético.

Com uma utilização de 80 pessoas em 60 horas por pessoa por semana, esse caso chama atenção por apresentar um alto nível de carga térmica interior, pois tem um auditório que reúne alto número de usuários em um único espaço. No entanto, o uso do edifício no verão é restrito para 10 pessoas por 40 horas semanais.

As soluções de baixo consumo de energia contemplam a utilização de bombas de calor geotérmicas, ar condicionado de alta eficiência e iluminação otimizada com máximo aproveitamento da luz natural.

Do conjunto de sistemas computacionais utilizados no projeto, os softwares que analisaram o comportamento térmico e dimensionamento dos sistemas de produção e consumo de energia merecem atenção especial. O DOE 2.1, do Departamento de Energia Americano, para análise do comportamento térmico e consumo de energia, e o Glenn Research Center da NASA, que tem explorado a ideia de

instalar uma célula de combustível de hidrogênio para armazenar energia produzida pelo conjunto de placas fotovoltaicas.

A geração de energia é realizada por meio de dois conjuntos de painéis fotovoltaicos: um de potência teórica de 60 kW instalado sobre o telhado e outro de 100 kW instalado em 2006 no estacionamento para suprir a ainda deficitária produção de energia. Com a operação do segundo conjunto de painéis fotovoltaicos, atingiu-se uma produção de 110% em relação ao consumo.

As medidas de eficiência energética englobaram: janelas estrategicamente posicionadas para maximizar os ganhos de calor e iluminação nos períodos de baixas temperaturas; inércia térmica elevada por meio de pisos de concreto e paredes de alvenaria exposta que ajudam a reter e irradiar o calor; e envolvente com alto isolamento térmico exterior, incluindo janelas de vidros triplos com preenchimento de gás argon.

Para a climatização, foram utilizados poços geotérmicos de circuito fechado, um sistema de ar condicionado de alta eficiência e bobinas radiantes para climatizar o auditório, quando necessário. No controle da ventilação, empregou-se sensores de dióxido de carbono em conjunto com janelas de operação automatizada.

Esse edifício ainda é referência no desenvolvimento de tecnologias de alta eficiência energética pelo seu caráter experimental. Seu balanço de energia elétrica anual é negativo em torno de 16 kWh, com o excedente de energia vendida para a concessionária local.

A segunda construção estudada nos EUA é a *Science House* no Museu de Ciência de Minnestona, inaugurada em 2004. A *Science House* foi concebida para servir de instalação pública ambiental experimental, sala de apresentações e espaço para eventos especiais do Museu. Esse edifício de energia zero tem como recurso de geração a utilização de painéis fotovoltaicos que geram até 8,8 kW. Uma das características marcantes dessa edificação é a sua capacidade de atingir o balanço nulo mesmo em condições de elevadas amplitudes térmicas, que chegam a 54 °C com umidades baixas no inverno e altas no verão.

O sistema de climatização é baseado em ventilação natural intensificada por uma chaminé térmica controlada por demanda, janelas de regulação automática e bombas de calor geotérmicas. A envolvente tem alto isolamento térmico proporcionando coeficientes de transferência de calor menores que 0,32 W/m².K nas janelas e resistências térmicas superiores a 25 m².K/W na envolvente opaca.

A iluminação natural é aproveitada ao máximo e a iluminação artificial é controlada por sensores tanto de presença quanto de luminosidade.

O local atinge anualmente a meta de energia líquida zero e é referência por causa da sua capacidade de superar as altas amplitudes térmicas.

Como última construção a ser mencionada dos EUA, a *Cypress Creek Store*, pertencente ao TD Bank, diferencia-se por pertencer à iniciativa privada com fins lucrativos. A loja bancária foi inaugurada em 2011, constando como a mais recente edificação de balanço energético nulo dos Estados Unidos na listagem do Departamento de Energia Americano. A meta de um consumo inferior à produção de energia foi atingida no intervalo do ano de 2012.

Característica peculiar desse projeto é o seu enquadramento em um clima classificado como muito quente e úmido, o que traz uma relevância adicional da construção para este trabalho, pois o clima local é semelhante.

A *Cypress Creek Store* tem uma ocupação de 12 pessoas, oito horas por semana cada, e 400 visitantes com permanência de 15 minutos por semana cada.

Os sistemas computacionais utilizados foram o PVWatt, do *National Renewable Energy Laboratory*, para projeto e análise dos painéis fotovoltaicos, e o Energypro 5.0, para análise térmica.

A geração de energia é provida por cerca de 400 painéis fotovoltaicos que geram 86 kW de potência, enquanto que a carga de refrigeração do edifício foi avaliada em 95,4 W/m².

O sistema de HVAC adotado foi de expansão direta por meio de um fluxo de refrigerante variável de alta eficiência com modulação digital de compressores scroll, proporcionando a carga de arrefecimento necessária.

As alternativas visando baixar o consumo de energia envolveram: baixos coeficientes de transferência de calor na envolvente; uso de paredes exteriores e telhado de cor clara; sombreamentos na envolvente envidraçada; redução das cargas internas por meio de equipamentos e iluminação eficiente; uso de permutador de calor entre o ar viciado e o ar de renovação; comissionamento do sistema de climatização; janelas e portas de alta performance que evitem a entrada de calor por condução ou radiação; maior vedação possível de janelas e portas evitando as infiltrações; e utilização de equipamentos de informática e outros eletrônicos com baixo consumo de energia elétrica.

Paralelamente na Alemanha, Bundesministerium fur Wirtschaft und Technologie (2013) apresenta uma relação de vários edifícios de alta eficiência que buscam um balanço energético nulo, ou que, em decorrência de climas muito críticos, procuram minimizar ao máximo o consumo.

Um salão de armazenamento de produtos com área aproximada de 2000 m² construído pela iniciativa privada em 1998, no estado de *Hessen*, destaca-se por apresentar novas soluções de climatização para a época. Elevados objetivos foram traçados a respeito do uso da luz solar, do sistema de ventilação por convecção natural e da recuperação do calor produzido pelas máquinas de produção próximas ao galpão.

Soluções envolvendo um forte isolamento térmico das paredes e do telhado foram implementadas, bem como o uso de claraboias verticais no telhado com o fim de ventilar e aproveitar a luz natural.

Para garantir o conforto térmico, foi implementado um duto subterrâneo. O duto rejeita calor para o solo nos períodos com necessidades de arrefecimento. No inverno, além de absorver calor do solo, é aquecido, por meio de um permutador de calor, utilizando o calor rejeitado das máquinas. Em última instância, o aquecimento pode ser realizado por um sistema de aquecimento radiante. O ar que circula no interior do duto é então movimentado por convecção natural em direção a um corredor que o distribui pelo resto do galpão.

O projeto obteve um sucesso parcial, porque apesar de economizar cerca de 60% da energia consumida em um galpão comum, não alcançou o consumo previsto de 22 kWh/m² ao ano. As causas que dificultavam um gasto ainda menor da energia foram apontadas como a necessidade de se utilizar a iluminação artificial em maior tempo do que o previsto e o período excessivo de portas abertas que dificultava a manutenção do conforto térmico no inverno, forçando a utilização de outros meios de aquecimento no duto subterrâneo.

Comissionamentos foram realizados no intuito de se chegar às metas propostas inicialmente. Os resultados foram positivos, mas os altos custos do empreendimento para a época acabaram por torna-lo pouco competitivo economicamente.

No mesmo ano e mesmo estado alemão, a Wagner & Co Solar Technology, empresa alemã de fabricação e comércio de painéis solares, fundou o prédio onde passou a funcionar a sua nova administração. Este é considerado o primeiro edifício alemão de grande porte construído de acordo com a filosofia de edificação passiva e provou ser um precursor para uma nova geração de edifícios passivos. As características do projeto contemplam soluções aprimoradas de isolamento térmico garantindo coeficientes de transferência de calor em torno de 0,15 W / m² · K na sua envolvente opaca e a utilização de janelas com vidros triplos preenchidos com gás inerte.

As soluções de climatização abrangeram um sistema de ventilação adotando um permutador de calor da terra acoplado na admissão do ar. O prédio é resfriado principalmente a noite, de maneira que, se necessário, as abas de ventilação na área do telhado e claraboias se abrem automaticamente. Dada a sua grande inércia térmica, concentrada principalmente nas lajes e nas paredes exteriores, a flutuabilidade térmica é amenizada, mantendo a temperatura interna inferior ao exterior durante o dia.

Para o aquecimento, evita-se ao máximo o uso dos radiadores, que concebe o sistema ativo de climatização. Usa-se então o sistema de ventilação que, em conjunto com o recuperador de calor, fornece a base para os requisitos de grandes quantidades de aquecimento do edifício. Os dutos de ar que circulam no solo aquecem previamente o ar, que passa também em um recuperador de calor acoplado a um tanque de termoacumulação que armazena o calor dos meses mais quentes para ser utilizado nos meses mais frios. Além do mais, é utilizado um permutador de calor de fluxo cruzado de quatro vias que remove cerca de 80 % do calor do ar de saída, cedendo-o ao ar novo admitido. Desse modo, o prédio tem sido aquecido ativamente somente entre dezembro e fevereiro.

No Brasil, Siqueira (2011) e Torres (2011) desenvolveram trabalhos a respeito do projeto de uma edificação com balanço energético nulo situada na região Sul do Brasil. O projeto foi realizado para uma ocupação com padrão de escritórios dentro de um ambiente acadêmico. Foram adotados painéis fotovoltaicos para a produção da energia necessária. Como medidas de redução do consumo energético, foram utilizadas medidas de aproveitamento da iluminação natural, seleção de equipamentos de alta eficiência, coleta de água das chuvas e a utilização de uma torre evaporativa para arrefecer os ambientes.

Nas simulações computacionais realizadas, o balanço energético nulo foi alcançado, com excesso de energia produzida, satisfazendo as condições de conforto térmico e iluminação adequada.

Para a simulação do edifício foi adotado o software *EnergyPlus* que apresentou as condições térmicas do edifício e a sua utilização de energia.

Os estudos de Siqueira e Torres entram como uma importante colaboração porque apresentam uma solução para a condição brasileira de utilização e construção de edificações, além de considerarem um clima típico de uma de nossas regiões. Apesar da contribuição apresentada, os estudos não satisfazem a necessidade de um desenvolvimento de projeto para regiões mais centrais do país, onde as temperaturas altas são predominantes e outras condições diferenciadas são encontradas.

Em Lisboa, Portugal, foi inaugurado em 2006 o Edifício Solar XXI (Em direção a energia zero, 2010). Bem como nos outros casos tratados, os conceitos de tecnologias renováveis foram integrados ainda na fase de concepção. O prédio de serviços é destinado à demonstração de atividades relacionadas com a eficiência energética e as energias renováveis, sendo simultaneamente um edifício de investigação nessas mesmas áreas.

Como conjunto de medidas construtivas de conforto térmico interior, foram adotados isolamento térmico integralmente aplicado pelo exterior, vão envidraçados orientados a Sul devidamente protegidos da radiação solar e sistema de tubos enterrados aliados a estratégia de ventilação natural por meio de chaminés térmicas.

Para análise do comportamento térmico foi utilizado o Software *EnergyPlus* do Departamento de Energia dos EUA.

O Edifício Solar XXI é vencedor do prêmio EDP 2005, na categoria de edifícios de serviços e classificado em 3º lugar no *European Award, Building-Integrated Solar Technology*, 2008.

Dessa maneira, conclui-se uma abordagem sobre as principais edificações concebidas à luz do ideal *nZEB* juntamente às soluções por elas utilizadas. Verifica-se uma carência de estudos acerca desse tipo de edificações para climas tipicamente brasileiros, principalmente devido às altas temperaturas encontradas constantemente nas regiões ao norte do trópico de capricórnio.

Conforme o estudo das edificações acima apresentadas, observa-se a recorrência de duas técnicas principais de manutenção do conforto térmico com baixo consumo de energia: o emprego do poço

provençal, realizando a permuta do calor do ar com a terra; e a ventilação forçada pelo uso de chaminés térmicas. Realizar-se-á abaixo a investigação das fontes bibliográficas que abordam esses assuntos com o fim de possibilitar o dimensionamento dessas técnicas na edificação proposta.

2.2 Poço Provençal

Poço provençal e poço canadiano tratam da mesma técnica de desenvolver um sistema de tubos que trocam calor do ar exterior com o solo no intuito de climatizar o ambiente. A diferença entre os dois termos decorre do fato de que o poço canadiano é comumente empregado quando o sistema visa aquecer o ar no inverno, enquanto que poço provençal visa arrefecer o ar no verão. Diante disso, sempre que os termos “poço provençal” ou “poço canadiano” aparecerem nesse trabalho, estarão se referindo à mesma técnica ou sistema de climatização.

Por se tratar do escoamento no interior de um tubo, os poços canadianos podem ser modelados por meio de correlações de transferência de calor para o caso em estudo. Incropera, et al. (2008) trazem um capítulo específico para o estudo de escoamentos internos, propondo análises conforme o regime do escoamento, as temperaturas de entrada e saída e as dimensões do tubo. Exemplos de diversas aplicações e soluções para a intensificação da transferência de calor são apresentados no texto complementando o estudo.

Trombe e Bourret apresentam um modelo de cálculo para validação de poços provençais. O modelo é construído com o princípio da superposição diante de soluções separadas para diferentes gradientes térmicos da terra, sendo a solução geral a soma das soluções separadas. No sistema, terra é submetida à troca de calor na superfície e à carga imposta pelo sistema de tubagem.

Esse modelo não leva em conta a transferência de calor radiativa e latente na superfície do solo e no poço. No entanto, é vantajoso por tratar o problema de forma analítica, evitando a necessidade do desenvolvimento de uma malha sobre a terra, e possibilitando a extensão do modelo desenvolvido em um poço para todos os demais, por meio do princípio da superposição.

O documento expõe que a técnica funciona muito bem para amortecer as oscilações de temperatura dia-noite, convertendo uma amplitude térmica de 10°C do ar exterior para 1°C do ar conduzido pelo poço. Dessa maneira o ar exterior entra no ambiente com cerca de 5°C abaixo da temperatura do ar exterior.

Outra experiência é relatada nesse estudo, agora comparando a eficiência de três poços de 10 metros de comprimento diferenciando-se apenas nos materiais de construção. O experimento demonstrou uma diferença máxima de apenas 2°C. No caso de um sistemas verdadeiro bem dimensionado, com comprimento de cerca de 30 metros, estima-se uma redução dessa diferença para 0,5°C. Por conseguinte, a escolha de um material constituinte para o poço não afeta significativamente a sua eficácia.

Parte importante é o estudo paramétrico desenvolvido. A partir do modelo construído e validado, a parte final do estudo avalia a diferença de diferentes parâmetros sobre o desempenho do poço. Os parâmetros serão resumidamente abordados abaixo, sendo mais profundamente referenciados no Capítulo 3.

- Comprimento do poço: Deve ser entre 25 e 40 metros. Abaixo dos 25 metros, a redução de temperatura não costuma ser satisfatória. Além dos 40 metros, o desempenho não aumenta significativamente.
- Diâmetro do tubo e velocidade do ar: A velocidade do ar não deve ser superior a 3 metros por segundo de modo a não induzir perda de carga excessiva. A taxa de variação das trocas de calor é pequena em função do diâmetro, mas recomenda-se manter o diâmetro entre 15 e 25 centímetros para se obter uma taxa de transferência de calor significativa.
- Temperatura de saída: É diretamente influenciada pela temperatura do solo, de modo que a sua amplitude diminui intensamente de acordo com o aumento da profundidade. Recomenda-se uma profundidade mínima de 1,5 metros, mas profundidades maiores permitem que se retire maior proveito da inércia térmica da terra.
- Tipo de solo: O tipo de solo não varia significativamente a temperatura de saída. Deve-se ter atenção somente para que se forem instalados mais de um poço, a distância entre os mesmos deve ser suficiente para permitir uma recuperação térmica do solo. Apesar de mencionar essa necessidade, o método empregado não considera essa questão.

O estudo termina concluindo que: o desempenho térmico de sistemas de permutação de calor com o solo podem ser avaliados com boa precisão, desde que se conheça as características térmicas do solo; a utilização do sistema no inverno, permite uma poupança de energia de aquecimento em cerca de 40%; e no verão, a capacidade de arrefecimento do ar durante os períodos mais quentes chega a 800 W por poço, podendo ser alterada conforme a mudança da velocidade do ar.

Kunetz e Lefebvre (2004) sob a tutela do professor Tromble, autor do estudo acima descrito, desenvolveram a avaliação de poços provençal em tempo real por meio de softwares. O modelo implementado em software permite que se conclua a temperatura libertada pelo poço em termos da sua profundidade, da temperatura do solo, do seu diâmetro e do fluxo de ar.

O estudo é relevante também no sentido de mostrar a importância do sol no cálculo da temperatura do solo a uma determinada profundidade. O modelo mostra que a 2 metros de profundidade, a diferença de temperatura entre um local com ou sem a incidência da radiação solar pode chegar a 4°C no verão.

Esses e outros estudos do Professor Alain Tromble fornecem uma ampla gama das abordagens teóricas e experimentais possíveis em poços canadenses ou provençais, possibilitando a definição do tamanho do poço com bastante precisão. Além disso, oferece dois tipos e modelos de análise adequados: um analítico outro numérico por diferenças finitas.

Benkert, Heidt e Scholer, desenvolveram um documento que descreve um software que avalia a contribuição de poços térmicos canadianos no espaço de acordo com o diâmetro, comprimento, profundidade a que eles estão dispostos e o tipo de solo, no qual são instalados.

O documento apresenta um método de cálculo analítico simplificado que foi incorporado ao programa. As principais simplificações envolvidas são: a terra é considerada homogênea em torno do trocador de calor, de maneira que as propriedades do solo são consideradas constantes; e as interferências de tubos trocadores de calor paralelos são assumidas como negligenciáveis.

Hollmuller (2002) abrange trocadores de calor geotérmicos em geral e especificamente os poços canadianos na última parte do trabalho. Diversos outros sistemas são descritos, mas vale aqui mencionar especialmente um deles apontado como uma boa alternativa para situações de arrefecimento. Segundo Hollmuller, é de bom proveito utilizar os pavimentos no subsolo como permutadores de calor do ar com a terra para armazenar o ar e fazer circulá-lo pelo edifício. O autor aponta essa solução como vantajosa e em termos de custo, e eficaz de tal forma a merecer prioridade sobre todos os outros sistemas de arrefecimento.

Na mesma tese são ainda tratados modelos numéricos por elementos finitos para análise dos sistemas de transferência de calor ar terra, trocadores de calor e outros sistemas geotérmicos.

Em resumo, essa tese aborda muitas frentes de estudo quanto aos poços canadianos, fornecendo critérios de simples a complexos para o dimensionamento, mas que segundo o próprio autor merece um aperfeiçoamento dependendo da tipologia do edifício a ser empregado. Uma das carências apontadas nesse sentido é a possibilidade de se utilizar o poço de modo a reduzir a inércia térmica do edifício no intuito de se poupar material de construção.

Hollmuller e Lachall trazem uma análise de viabilidade econômica demonstrando a competitividade dos poços canadianos em comparação com um sistema de ar condicionado convencional. As conclusões do estudo mostram que, especificamente para os casos de arrefecimento, a utilização dos trocadores de calor ar-solo são viáveis por serem tornarem mais baratos do que as técnicas convencionais de climatização.

Thierry, et al. desenvolveram um relatório técnico completo dos poços canadianos, envolvendo o seu dimensionamento e análise.

Já no início do relatório é apresentada uma síntese da análise dos parâmetros envolvidos na modelagem dos poços, diante da bibliografia analisada pelos autores.

O documento continua por desenvolver um modelo de dimensionamento de poços canadianos a partir das considerações acima mencionadas. O desenvolvimento do modelo proposto envolve a determinação do perfil de temperatura do solo e o balanço térmico do escoamento do ar nos dutos.

A modelagem térmica do solo é realizada considerando o solo como um meio semi-infinito sob a excitação de uma temperatura superficial na forma de um sinal senoidal. Em geral, quanto maior a

profundidade, menor é a amplitude do sinal e a sua resposta é retardada em relação à excitação na superfície.

Na superfície, o solo troca calor com a atmosfera por condução, convecção e de forma latente, além de trocar calor com o céu e com o sol por radiação. Estudos apontam que as trocas por convecção são as mais intensas, seguidas pelas trocas por radiação e então pela latente. O modelo analítico é então desenvolvido considerando as trocas mencionadas.

Os dutos tem sua modelagem executado por um software Pléiades + Comfie, considerando como hipóteses:

- Uma entrada vertical que levará o ar até os diversos dutos subterrâneos;
- Um ou mais dutos dispostos horizontalmente e paralelamente, com igual fluxo de ar e propriedades físicas idênticas;
- Uma saída vertical que recebe o ar passado nos dutos;
- O solo tem propriedades térmicas homogêneas;
- A temperatura do ar na admissão de cada duto no subsolo é a mesma.

Dessa forma, o modelo é desenvolvido para um único duto e estendido por simetria para os demais.

Abaixo é apresentada resumidamente as conclusões bibliográficas acerca de cada parâmetro. Essa análise é aprofundada no Capítulo 3, onde será proposto um método simplificado de dimensionamento de poços canadinos.

- Fluxo de ar nos dutos: Deve ser determinado de forma combinada entre as necessidades de arrefecimento do edifício e os limites superiores de velocidade nos dutos de forma a controlar as perdas de carga;
- Comprimento dos dutos: Determinado do fluxo de ar. A literatura mostra que o comprimento dos dutos deve aumentar conforme o fluxo de ar. No entanto, há sempre um comprimento limite em que o trocador atinge o seu máximo de eficácia.
- Diâmetro dos dutos: O aumento do diâmetro, aumenta a superfície de troca de calor, mas não necessariamente a troca de calor em si, já que uma parede maior do ar não entra em contato com a superfície. Além de um certo valor ótimo do diâmetro, passa a ocorrer uma queda no coeficiente convectivo devido à redução da velocidade de fluxo de ar e consequente redução da camada limite térmica. O ar que circula no centro do duto não entrará mais em contato com o duto e a sua temperatura será pouco afetada pela temperatura do solo. Em geral, os valores utilizados para o diâmetro variam em torno de 20 cm.

- Distância entre as linhas: verifica-se que esse parâmetro não foi comumente abordado nos estudos realizados. No entanto, parece importante para assegurar que uma distância mínima de 40 cm, suficiente para reduzir a interação entre dois tubos adjacentes.
- Profundidade de enterramento dos tubos: Por atuarem como amortecedores térmicos, os poços canadenses devem ser enterrados a profundidades razoáveis. Uma maior profundidade aumenta o amortecimento térmico esperado. Esse é um importante parâmetro a ser determinado no dimensionamento do sistema e varia em função do gradiente de temperaturas do solo, influenciado pela radiação solar, tipo de solo, umidade, entre outros fatores. Estima-se como uma aproximação inicial que uma profundidade de 40 cm é suficiente para amortecer somente as alterações de temperatura ao longo de um dia. Já se o intuito envolver também o amortecimento de alterações térmicas sazonais, a profundidade mínima de enterramento passa para em torno de 2 metros. Em ambos os casos, maiores profundidades sempre aumentam ainda mais a eficiência do sistema, mas os custos de instalação do sistema tornam-se maiores do que a economia marginal de energia.
- Qualidade do solo e umidade: A capacidade térmica e condutividade do solo tem importante impacto sobre a eficácia do sistema. Essas características dependem da composição do solo e da umidade, principalmente devido à migração da água na sua superfície. Um solo mais úmido é mais inercial que um de menor umidade. Dessa maneira, é mais interessante que no local de instalação dos poços se tenha um solo de alta umidade. Além da capacidade térmica, a maior presença de partículas de água incentiva a condutividade térmica do solo para os dutos do poço, tendo então duplo efeito benéfico.
- A rugosidade interior dos dutos: Tem efeito positivo e negativo, não havendo um consenso sobre qual é preponderante. Positivamente, a maior rugosidade cria ou aumenta a turbulência do escoamento, incentivando a transferência de calor convectiva. Negativamente, tem duplo efeito: aumenta a perda de carga do sistema de ventilação e pode levar ao acúmulo de água parada.
- Propriedades físicas dos dutos: Condutividade e capacidade térmica são normalmente negligenciadas nos estudos consultados. Normalmente, apenas adotam-se dutos com menor espessura. No entanto, vale levar em conta essas propriedades quanto ao comportamento dinâmico do permutador.
- Geometria dos dutos: Normalmente consiste em tubos dispostos em paralelo, subdivididos logo após a entrada do no solo. No trajeto, evitam-se transições e curvas que induzam altas perdas de carga.
- Velocidade do ar: Comumente se encontram velocidades de 2 a 4 metros por segundo, mas não é algo restrito pela literatura.

2.3 Chaminé Térmica

Chaminé térmica, também chamada de chaminé solar quando utilizada acoplada a um painel solar, é um mecanismo de ventilação natural utilizado para otimizar a circulação do ar em edifícios. Baseada no aumento de temperatura que a radiação solar induz em uma parede, a chaminé tira proveito do fenômeno convecção natural sobre uma placa plana quando aquecida, induzindo uma movimentação do ar para a parte superior e criando uma zona de baixa pressão na parte inferior. Esse gradiente de pressão gera uma sucção do ar pela parte inferior da chaminé e uma exaustão pela parte superior.

O estudo de chaminés térmicas envolve abordagens complexas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Trabalhos diversos estão disponíveis, apresentando diferentes metodologias de análise para tipos distintos de construção do mecanismo. Nas análises desse mecanismo, o objetivo principal é identificar o potencial de vazão diante das condições ambientais de operação.

A utilização de chaminés térmicas no Brasil pouco tem sido explorada no âmbito da climatização. Em sua maior parte, o uso é voltado para a secagem de grãos, produtos agrícolas e madeira conforme abordam Altemani (1976) e Martins (2002).

Em países de clima temperado, a utilização das chaminés é comum, normalmente com a abertura superior ligada aos ambientes, de modo que o ar, após passar pela chaminé e ser aquecido, é insuflado no interior do edifício.

Frank (1981) é encontrado como o primeiro estudo brasileiro de chaminés térmicas voltadas para a climatização de edificações. Nesse trabalho, modelos matemáticos foram desenvolvidos para a análise de chaminés de grande porte para melhorar a ventilação natural em ambientes industriais.

Em consequência da complexidade dos fenômenos envolvidos, os monitoramentos experimentais tem recebido maior foco das pesquisas, apresentando como resultado as correlações empíricas para a taxa de vazão do sistema.

Na Universidade Federal de Minas Gerais, Ferreira, et al. (2006) desenvolveram o balanço energético de uma chaminé solar com a construção de um protótipo de uma chaminé solar. Distintamente do normalmente utilizado em chaminés solares, a cobertura do coletor foi confeccionada com filmes plásticos termodifusor e do tipo estufa. Apesar da menor eficiência desse tipo de cobertura em relação ao vidros comumente utilizados, a massa do dispositivo foi reduzida em grande parte, possibilitando a construção de um dispositivo com maiores dimensões.

Foi realizado um balanço da radiação solar incidente sobre o interior do protótipo juntamente com o balanço de energia, desenvolvido por meio das medições da distribuição de radiação solar, temperatura, velocidade e umidade relativa.

O documento relata a aplicabilidade do dispositivo para a geração de energia elétrica por meio da energia eólica gerada no interior da chaminé que pode ser aproveitada com a passagem do escoamento

de ar por uma turbina axial. Também é apresentada uma avaliação profunda sobre os tipos de coberturas plásticas a serem utilizadas e a comparação com a utilização do vidro, concluindo que, apesar de ter algumas vantagens, a cobertura com filmes plásticos traz dificuldades quanto ao excesso de transmissão de radiação infravermelha pela cobertura e da radiação do solo para o ambiente, ao escoamento das águas das chuvas e à resistência mecânica, reduzindo significativamente as possibilidades de utilização desse tipo de cobertura.

A análise do desempenho de chaminés solares por simulação computacional foi desenvolvida por Roriz (2010) e calibrada numa célula de teste por Neves (2012). As simulações computacionais foram realizadas por Roriz através do modelo de cálculo de fluxo de ar do pacote AirflowNetwork do programa EnergyPlus. As simplificações utilizadas pelo pacote computacional para esse tipo de análise foram analisadas experimentalmente por Chungloo, et al. (2006) e obtiveram boa concordância entre a distribuição da temperatura do ar.

Em complemento a análise, Roriz (2010) desenvolveu o programa Chaminé 1.0, que estima a ventilação induzida por chaminé solar em edificações. As equações implementadas no programa foram obtidas de análises paramétricas de resultados de centenas de simulações elaboradas no EnergyPlus. Os resultados foram comparados por Neves (2012) em uma célula de teste e apresentaram resultados confiáveis para grande parte das condições consideradas.

Neves (2012) publicou uma tese que apresenta um estudo sobre chaminés solares por meio de procedimentos experimentais e teóricos. Como fruto dos dois procedimentos, a autora realiza a calibração do modelo teórico diante dos dados experimentais, apresenta uma análise paramétrica da chaminé solar para climas típicos do território brasileiro e verifica a interferência do vento no desempenho de uma chaminé solar.

O estudo traz já na introdução duas tabelas importantes, apresentada no Anexo I, que resumem os dados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares e os resultados obtidos.

Pelos dados das tabelas, verifica-se a importância da configuração geométrica da chaminé, dado que o desempenho do mecanismo está diretamente relacionado às taxas de ventilação e de transferência de calor que dependem da configuração geométrica. As dimensões a serem definidas incluem a espessura do canal de ar, a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída e a inclinação do coletor solar, quando o mesmo for empregado.

Além das características geométricas, deve-se atentar também para as características construtivas. As pesquisas apontam que a placa absorvedora deve ser constituída por um material de elevada absorvância e condutividade térmica, como por exemplo uma chapa de metal pintada com tinta escura. Se desejável o acúmulo de calor para proporcionar ventilação noturna, deve-se optar então por um material de elevada capacidade térmica, devendo-se, no entanto, levar em consideração a massa do sistema como um todo que pode dificultar a instalação sobre a edificação. Por essa causa, é mais comum

a utilização do recurso de acúmulo de calor em chaminés verticais. No entanto, o bom desempenho de chaminés verticais é limitado a regiões de altas latitudes em virtude da inclinação solar (Neves, 2012).

Outros parâmetros que devem ser considerados no projeto da chaminé e as soluções comumente adotadas são apresentadas abaixo:

- A espessura da parede absorvedora: de 5 a 20 cm
- Isolamentos térmico das faces externas: resultados experimentais apontam para uma redução na eficiência de até 60% para chaminés que não utilizam isolamento. Materiais comumente empregados são poliestireno expandido, poliuretano expandido, fibra de vidro ou madeira compensada. A espessura dos isolamentos deve variar de 5 a 10 cm.
- Vidro da cobertura: deve ter elevada transmitância à radiação solar e uma baixa transmitância à radiação infravermelha, minimizando as perdas de radiação térmica emitida pelo absorvedor para o ambiente (Ferreira, et al., 2006).

US Department of Energy (2013) apresenta um método de cálculo para a modelagem de uma chaminé térmica no programa *EnergyPlus* na análise térmica da edificação. O método empregado no *EnergyPlus* procura modelar os efeitos do balanço de calor do ar da chaminé térmica, equilibrar os movimentos do ar causados pela chaminé e relatar outras variáveis apropriadas do sistema. O modelo é ligado ao balanço de calor de forma semelhante à infiltração e aos modelos de ventilação, sem fazer parte, no entanto, de um sistema de HVAC.

Para os cálculos, o programa requer as seguintes entradas:

- Distância de cada entrada de ar para a saída no topo da chaminé;
- Proporção relativa do fluxo de ar em cada entrada;
- Largura da parede do absorvedor;
- Coeficiente de descarga;
- Área da seção transversal da saída do canal de ar;
- Área da seção transversal de cada entrada de ar;

As simplificações adotadas pelo programa são:

- A temperatura da placa de vidro e da parede do absorvedor são uniformes;
- A temperatura do ar de uma entrada da chaminé é a mesma temperatura do local de onde veio o ar;
- A resistência ao fluxo devido ao atrito superficial é negligenciável;
- A vazão de ar proporcionada pela chaminé é convertida em infiltração de ar exterior.

3 LOCALIZAÇÃO, CLIMA E PROPOSTA ARQUITETÔNICA

Apresenta-se a proposta arquitetônica desenvolvida por equipe da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de Brasília, juntamente com a análise do clima local e da localização geográfica proposta.

3.1 Localização

Em análise junto ao Centro de Planejamento da UnB, propõe-se a construção do edifício no Parque Científico e Tecnológico, localizado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

O local sugerido está a sudeste do Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT) e a sul do Centro de Seleção e Promoção de Eventos (CESPE), conforme se observa na Figura 7. As coordenadas geográficas do local são:

Latitude: 15° 46' 30,00'' S

Longitude: 47° 51' 57,00'' W

Elevação: 1040 m



Figura 7: Imagem de satélite do Campus Darcy Ribeiro com indicação do local sugerido para construção do Edifício nZEB.

3.2 Condições climáticas locais

O clima de Brasília é caracterizado como Tropical de Altitude, por apresentar características térmicas e de precipitação impostas pela altitude.

Análises climáticas do local indicam para o comportamento da temperatura e umidade indicam para um período quente e úmido, de outubro à abril, com baixas amplitudes térmicas, e um período seco e de menores temperaturas de maio a setembro. Outubro é predominantemente o mês mais quente do ano, pois tem a mais elevada temperatura média das médias, em aproximadamente 23°C, e média das máximas de 29,2 °C. No entanto, o mês de setembro é apresentado como um dos piores, do ponto de vista do conforto térmico, pois combina elevadas temperaturas e baixa umidade (Maciel, 2002). No entanto, uma análise da temperatura média diária mostrada na Figura 8, para o arquivo climático adotado nas simulações do *Intenational Weather for Energy Calculations* (IWEC) e recomendado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE), mostra que o mês de fevereiro também apresenta condições de temperatura elevadas.

Diante disso, conclui-se que os edifícios possuem uma tendência de apresentar os picos de carga térmica para os meses de outubro, em virtude da alta temperatura de bulbo seco; ou de fevereiro, devido ao balanço entre alta temperatura de bulbo seco e alta umidade relativa.

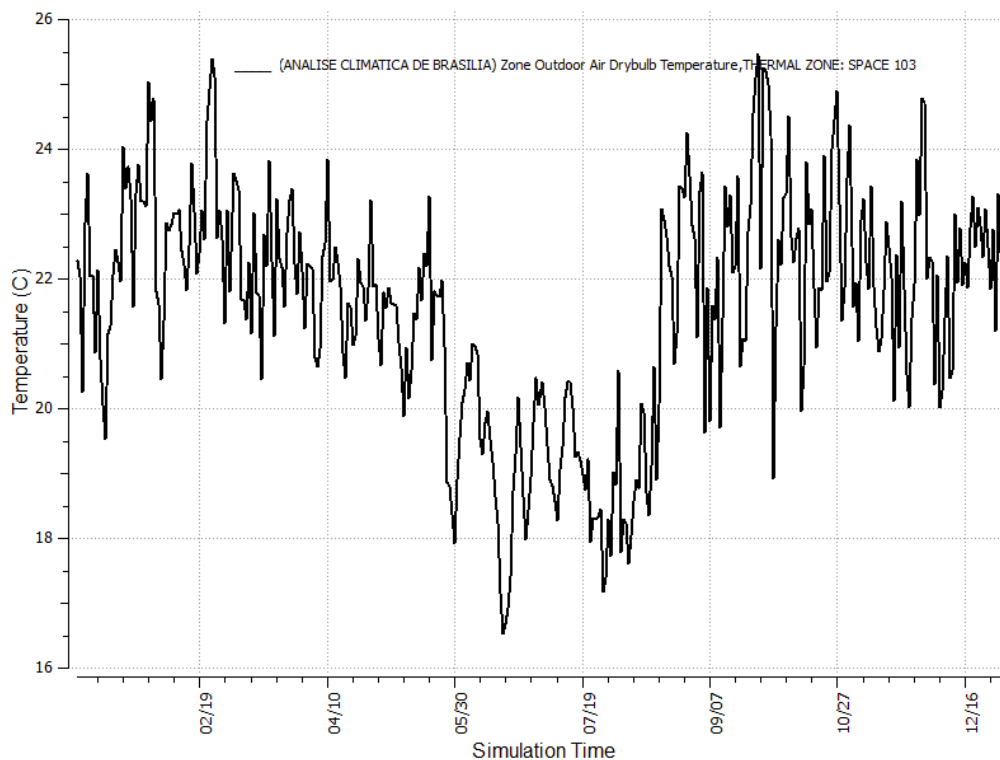


Figura 8: Média diária das temperaturas de bulbo seco de Brasília

Com relação à precipitação, uma característica típica do clima brasiliense é a escassez de chuvas no inverno. Os meses de maio a setembro costumam ter baixas taxas de pluviosidade, além de serem comuns períodos de seca superiores a 2 meses.

Os ventos são predominantemente da direção leste, com variações para sudeste ou nordeste. A intensidade varia ao longo do ano, apresentando picos máximos de até 8 m/s em agosto. O perfil de intensidade média diária dos ventos ao longo de um ano típico adotado no arquivo climático é mostrado na Figura 9.

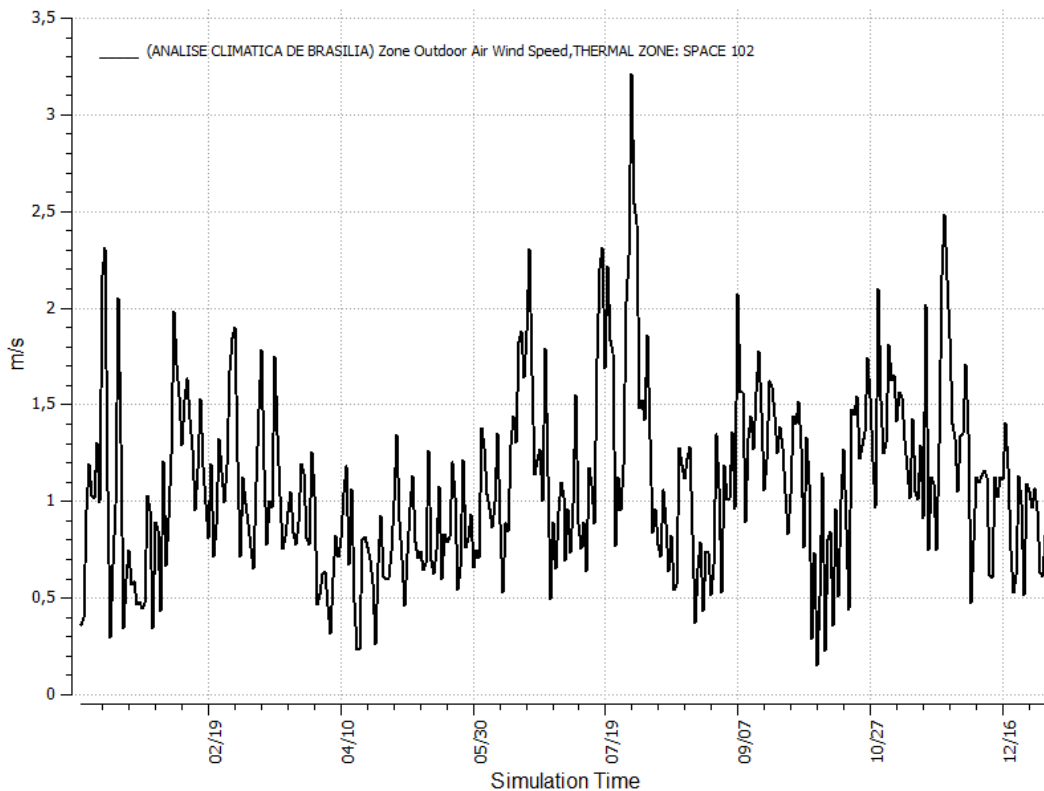


Figura 9: Perfil anual da média diária de intensidade dos ventos

Diante do apresentado para os diversos fatores climáticos, pode-se dizer que as maiores dificuldades a serem contornadas em relação ao clima são:

- Temperatura máxima

Temperaturas máximas podem chegar a 34°C, nos meses de fevereiro, setembro e outubro.

- Umidade relativa reduzida

Baixas umidades relativas no inverno podem atingir níveis de até 15%.

- Radiação Solar predominantemente direta

A radiação é predominantemente direta e com pouca composição difusa, o que favorece o aquecimento dos ambientes e dificulta a iluminação natural sem a incidência direta dos raios solares.

Ainda que as características acima apresentadas se mostrem como empecilhos para a manutenção do conforto térmico, em alguns períodos específicos a combinação de outros fatores, quando bem aproveitados, se contrapõem, favorecendo a implantação de princípios bioclimáticos para as edificações da cidade. Por exemplo, períodos quentes e úmidos, onde a ventilação seria mais recomendável, possuem uma maior intensidade de ventos. Enquanto que os período com temperaturas mais reduzidas, apresentam ventos com intensidades menores (Maciel, 2002). Além disso, nos meses de setembro e outubro que apresentam altas temperatura de bulbo seco, a umidade relativa ainda é bem reduzida, favorecendo estratégias de climatização baseadas no resfriamento evaporativo.

3.3 Proposta arquitetônica

A proposta arquitetônica do edifício foi desenvolvida por professores e alunos da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB buscando conceber um prédio experimental com laboratórios, salas multiuso, auditório e escritórios que proporcionem atender à comunidade acadêmica e externa no âmbito da eficiência energética em edifícios.

Quatro departamentos da Universidade deverão se dividir na coordenação do edifício, cada um tratando das suas especialidades aplicadas ao funcionamento da edificação na sua máxima condição de eficiência energética. Os departamentos deverão ser compostos por equipes da arquitetura, engenharia mecânica, engenharia civil e engenharia elétrica. A divisão dos espaços para cada departamento levou em conta um plano de necessidades apresentado na

Tabela 1 criteriosamente desenvolvido pela equipe da FAU.

O uso e ocupação do solo considerou um projeto de urbanização a partir de parcelas que otimizem a acessibilidade, priorizando formas regulares e semelhantes, e evitando áreas residuais (Birck, 2014).

A proposta visa trabalhar de modo otimizado com a bioclimática local, fazendo o aproveitamento ótimo da radiação solar para a produção de energia, e dos ventos para potencializar a ventilação natural.

A concepção arquitetônica iniciou-se por meio de três envoltórias básicas, mostradas na Figura 10, que foram analisadas termicamente para basear o projeto arquitetônico definitivo.

Tabela 1: Plano de necessidades desenvolvido elaborado pela FAU

Nome do ambiente	m ²	Quantidade	Total
Sala computadores	24	4	96
Sala coordenação	10	4	40
Sala para professores	20	4	80
Sala para pesquisadores	20	2 x 4	160
Sala de reunião	20	4	80
Sala para empresa vinculada	20	4	80
Laboratório de experimentação	300	4	1200
Sala multiuso	50	4	200
Auditório para 100 pessoas e apoio	150	1	150
Salão comum	30	1	30
Áreas administrativas e suporte	20	4	80
Comércio	20	1	40
Sanitário	25	8	200
Depósito	5	4	20
Copa	5	4	20
			2476
Circulação			+ 247
Total			2723

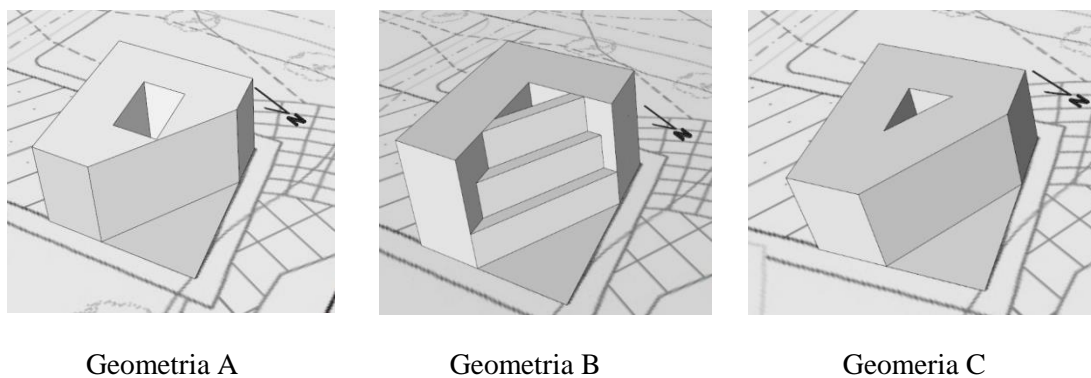


Figura 10: Geometrias preliminares disponibilizadas pela equipe da Arquitetura

Os resultados das simulações térmicas apontaram para um melhor desempenho da geometria B, permitindo à equipe arquitetônica os parâmetros iniciais para o desenvolvimento do projeto.

Para atender à utilidade do edifício, foi desenvolvido um plano de necessidades que adequa o prédio experimental à realização de outras atividades. O plano contempla salas multiuso, setores de administração, salas para professores e empresas, auditório, sanitários, copa, laboratórios e salas de aula.

O plano de necessidades foi atendido com um zoneamento dividido em dois setores: área experimental; e área social. A área experimental terá dois pisos e pretende abrigar dois grandes laboratórios. A área social terá três pisos e será composta pelas salas, áreas de circulação e auditório.

As plantas baixas para cada um dos três pisos do edifício disponibilizadas pela equipe do projeto arquitetônico são disponibilizadas nos anexos. Apresenta-se também nos anexos um estudo sobre as diretrizes para uma iluminação eficiente.

A Figura 11 traz o modelo tridimensional desenvolvido para atender às necessidades apresentadas.

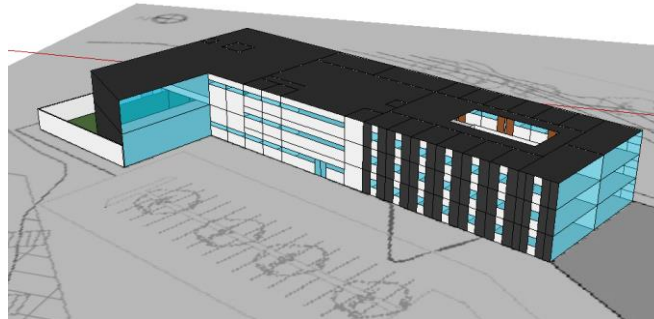


Figura 11: Modelo arquitetônico tridimensional do edifício nZEB (Birck, 2014)

O aproveitamento da radiação solar está previsto por meio de uma cobertura ampla e aberta, disponível para o posicionamento de painéis fotovoltaicos biarticulados. Além disso, também se prevê o aproveitamento da fachada noroeste para o posicionamento de células fotovoltaicas nas persianas exteriores das janelas.

A ventilação natural foi intensificada por meio de uma ampla fachada sudeste para aproveitar os ventos predominantes; um átrio central aos escritórios que possibilitará a circulação do ar por convecção natural; e uma parede estrategicamente posicionada à noroeste, disponível para a implementação de uma chaminé solar que causará uma pressão negativa nos laboratórios no período vespertino.

4 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

A escolha das soluções de climatização levou em conta a criticidade dos ambientes atendidos e os resultados das simulações térmicas realizadas no Capítulo 5. Locais em que o uso típico não apresente a necessidade de um controle rígido de temperatura deverão ser atendidos por soluções alternativas de climatização, visando reduzir os gastos de energia.

Os escritórios, salas multiuso e o auditório, por serem ambientes com uma alta necessidade de controle do conforto, serão atendidos por um sistema de expansão indireta, baseado em distribuição de água gelada para três *fancoils*, um em cada piso. O equipamento resfriador de líquido utilizado na simulação será um *chiller* genérico com as configurações de desempenho previamente configuradas na biblioteca do software e semelhantes aos *chillers* comercialmente disponibilizados.

Já os laboratórios e as áreas de circulação serão climatizados por soluções alternativas de baseadas na otimização da ventilação natural pela chaminé térmica, no pré-resfriamento do ar por trocadores de calor geotérmicos (poço provençal) e no resfriamento evaporativo do ar.

Além das alternativas inicialmente propostas, as instalações mecânicas de climatização deverão permitir facilmente a troca do sistema utilizado por outro experimental. Pretende-se com isso avaliar com facilidade o comportamento de novos sistemas de climatização sob condições variadas de demanda térmica. Visando permitir essa flexibilidade de experimentação, as tubulações de água gelada e os dutos de ar deverão ser dotados de acoplamentos ajustáveis possibilitando a integração com sistemas variados. Os sistemas de resfriamento e distribuição do ar deverão ser múltiplos, de forma que um mesmo ambiente poderá ser climatizado por *fancoils*, tetos radiantes, ou pelo princípio do *displacement ventilation* utilizando o insuflamento por um piso elevado.

As seções seguintes abordarão os princípios básicos das quatro soluções principais utilizadas no edifício.

4.1 Água gelada

O sistema de água gelada é proposto para atender ao setor social do edifício, que necessita de um controle rígido de temperatura para manter as condições internas de conforto térmico dentro dos limites estabelecidos.

A carga térmica simultânea máxima demandada por esse setor é de 121,8 kW, ou aproximadamente 34,6 TR. Para atender essa demanda, será utilizado um resfriador de líquido de 35 TR com condensação a ar. As especificações técnicas do *chiller* para a condição de referência são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas do *Chiller* para as condições de referência

Configurações de referência do <i>Chiller</i>	
Capacidade Térmica [TR]	35
COP	3,5
Regime mínimo de operação	20%
Regime de operação de eficiência ótima	90%
Temperatura de saída da água gelada	6,7°C
Temperatura de entrada do ar para condensação	29,5°C

O desempenho do *chiller* fora da condição de referência é simulado no *EnergyPlus* por meio de três curvas de desempenho (University of Illinois, 2013).

- Curva de capacidade de resfriamento em função da temperatura da água gelada e da água de condensação

A curva é representada por uma equação polinomial biquadrática em que o coeficiente de capacidade de resfriamento do *chiller* (Cr) é função da temperatura da água gelada na saída do *chiller* ($T_{ag,sc}$) e da temperatura da água de condensação na entrada do *chiller* ($T_{ac,ec}$). Os coeficientes apresentados na equação são típicos para *chillers* dessa faixa de aplicação, selecionados na biblioteca de equipamentos do próprio *EnergyPlus*.

$$Cr = a + b \cdot T_{ag,sc} + c \cdot (T_{ag,sc})^2 + d \cdot T_{ac,ec} + e \cdot (T_{ac,ec})^2 + f \cdot T_{ag,sc} \cdot T_{ac,ec} \quad (1)$$

$$Cr = 1,0215158 + 0,037036 \cdot T_{ag,sc} + 0,000233 \cdot (T_{ag,sc})^2 - 0,003894 \cdot T_{ac,ec} - 6,52 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{ac,ec})^2 - 0,000268 \cdot T_{ag,sc} \cdot T_{ac,ec}$$

- Curva de potência elétrica em função da curva de temperatura

A relação entre a potência absorvida e a capacidade de refrigeração (COP_T) é representada por meio de uma equação polinomial biquadrática em função das temperaturas de água gelada na saída do *chiller* ($T_{ag,sc}$) e da temperatura da água de condensação na entrada do *chiller* ($T_{ac,ec}$).

$$COP_T = a + b \cdot T_{ag,sc} + c \cdot (T_{ag,sc})^2 + d \cdot T_{ac,ec} + e \cdot (T_{ac,ec})^2 + f \cdot T_{ag,sc} \cdot T_{ac,ec} \quad (2)$$

$$COP_T = 0,701769 - 0,004520 \cdot T_{ag,sc} + 5,3311 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{ag,sc})^2 - 0,005498 \cdot T_{ac,ec} + 5,4458 \cdot 10^{-4} \cdot -7,2903 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ag,sc} \cdot T_{ac,ec}$$

- Curva de potência elétrica em função da razão de carga parcial

A razão entre a potência absorvida e a capacidade de refrigeração (COP_{CP}) são avaliadas em função da razão de carga parcial. A curva é modelada por uma equação polinomial quadrática em função

coeficiente do regime em carga parcial (PLR). O coeficiente em carga parcial é a razão entre a carga sensível e a capacidade sensível de refrigeração do equipamento em estado estacionário.

$$COP_{CP} = a + b \cdot PLR + c \cdot PLR^2 \quad (3)$$

$$COP_{CP} = 0,063691 + 0,584888 \cdot PLR + 0,352803 \cdot PLR^2$$

Ligado ao *chiller*, um sistema de bombeamento levará a água gelada até três *fancoils* posicionados um em cada piso do edifício. O conjunto de bombas foi modelado considerando uma capacidade variável de bombeamento até uma vazão máxima de 18 m³/h e um levantamento de pressão de 20 metros de coluna d'água. O motor elétrico acoplado à bomba é de 1200 W potência elétrica e 90% de eficiência. A Figura 12 mostra a modelagem do sistema de resfriamento e distribuição de água no *OpenStudio*, enquanto que a Tabela 3, traz a simbologia dos equipamentos utilizados.

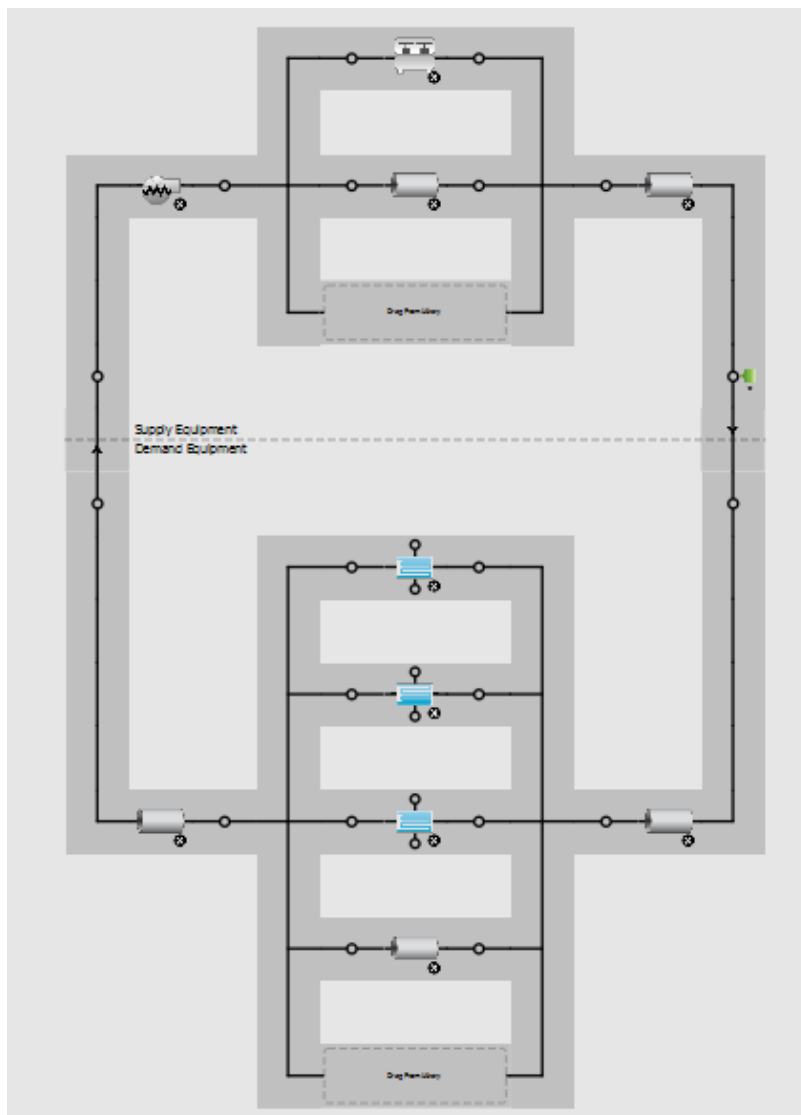







Figura 12: Sistema de refrigeração e distribuição de água modelado no *OpenStudio*

Tabela 3: Simbologia utilizada pelo *OpenStudio* para o sistema de resfriamento de água

	Resfriador de líquido (<i>Chiller</i>) baseado no ciclo de compressão a vapor com condensação a ar.
	Bomba de volume variável (Já inclui o motor elétrico acoplado)
	Tubulação adiabática
	Sensor de temperatura da água
	Trocador de calor (<i>Fancoil</i>) - Só módulo resfriador

O sistema de distribuição de ar será realizado por meio dos três *fancoils* dotados de ventiladores de volume variável e eficiência de 60,45%. O motor elétrico dos ventiladores terá um variador de frequência para permitir rotações variáveis. A eficiência do motor é de 93% quando avaliado em carga plena. O desempenho do conjunto de ventilação em carga parcial é dado por uma equação polinomial de quarta ordem mostrada na Equação (4), que traz a fração de carga parcial (PLF) em função da fração de volume de ar ventilado (FF).

$$PLF = C_1 + C_2 \cdot FF + C_3 \cdot FF^2 + C_4 \cdot FF^3 + C_5 \cdot FF^4 \quad (4)$$

$$PLF = 0,040760 + C_2 \cdot 0,0880450 - C_3 \cdot 0,072926^2 + C_4 \cdot 0,943739^3$$

As configurações de vazão máxima e a pressão estática disponíveis para cada *fancoil* são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Configuração dos *fancoils*

Área de atendimento	Vazão [m ³ /s]	Pressão estática [Pa]
1° Piso	3,2	200
2° Piso	1,5	200
3° Piso	1,5	200

Será utilizado um recuperador de calor entre o ar rejeitado e o ar de renovação. A eficiência do trocador foi determinada para duas condições de operação: com 100% da vazão total, eficiência de 75%; e 75% de vazão total, eficiência de 73%.

A modelagem do sistema de distribuição de ar no *OpenStudio* é apresentada para o sistema do primeiro piso na Figura 13 e a simbologia utilizada no programa é apresentada na Tabela 5. Não foram representados todos os terminais de ar, visto que tornaria a figura demasiadamente grande e que a omissão destes não acarreta em perda de informação útil.

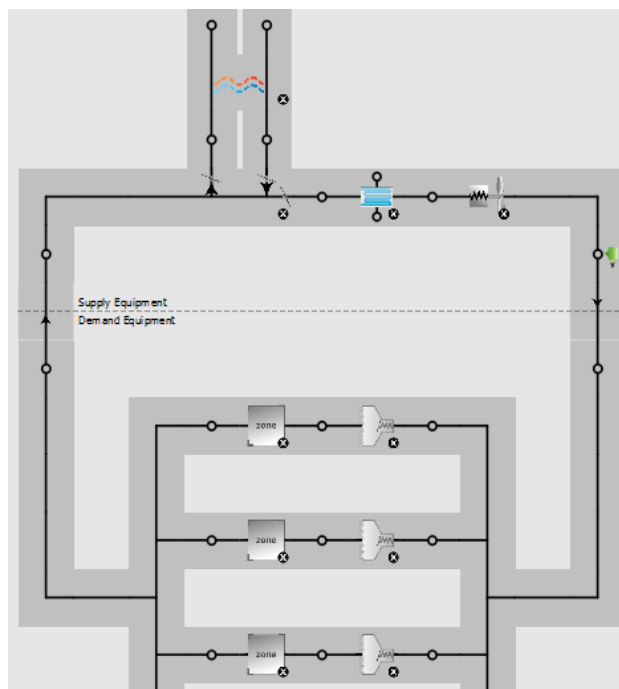








Figura 13: Sistema de distribuição de ar modelado no OpenStudio

Tabela 5: Simbologia utilizada pelo *OpenStudio* para o sistema de distribuição de ar

	Zona térmica climatizada
	Terminal de ar com volume de ar variável (VAV) sem reaquecimento
	Módulo ventilador com velocidade variável do <i>Fancoil</i>
	Trocador de calor (<i>Fancoil</i>) - (Só módulo resfriador)
	Recuperador de calor
	Sensor de temperatura do ar

4.2 Resfriamento evaporativo

O resfriamento evaporativo atenderá aos laboratórios e às áreas de circulação do edifício em conjunto com o poço provençal e com a chaminé térmica, abordados nas Seções 4.3 e 4.4, respectivamente. Essas três soluções juntas deverão oferecer conforto térmico ao menor consumo possível de energia.

A carga térmica máxima simultânea dos dois laboratórios e das três áreas de circulação foi calculada em 71,56 kW ou 20,35 TR.

O sistema evaporativo foi dimensionado utilizando o módulo de simulação do *EnergyPlus: EvaporativeCooler:Direct:ResearchSpecial*. O módulo simula o comportamento simplificado de um painel evaporativo onde ocorre a circulação de um volume de água em contato com uma corrente de ar induzida por um sistema de ventilação. A água evapora ao entrar em contato com o ar e roubando-lhe calor. Dessa maneira, o painel promove a saturação adiabática do ar, reduzindo a sua temperatura e aumentando sua umidade. O processo termodinâmico envolve simultaneamente transferência de calor e de massa em decorrência do resfriamento com entalpia constante (University of Illinois, 2010). Na Figura 14, os pontos 1 e 2 representam o comportamento psicrométrico do ar entre a entrada e saída do ar no módulo evaporativo para uma condição climática crítica da cidade de Brasília.

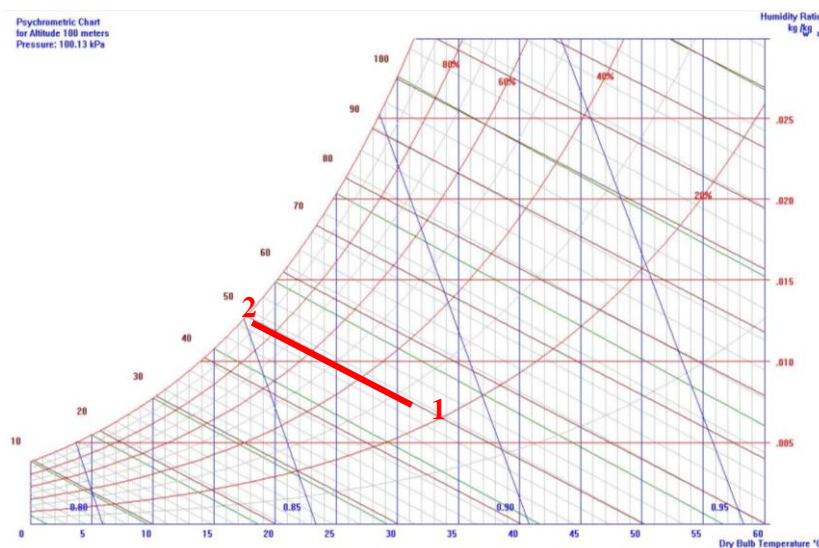


Figura 14: Processo psicrométrico do ar ao passar pelo módulo evaporativo

A eficiência do sistema foi definida em 90%. A eficiência de um módulo evaporativo é avaliada como a sua capacidade de saturar a umidade do ar, conforme apresenta a Equação (5).

$$\mathcal{E} = \frac{T_{bs,saída} - T_{bs,entrada}}{T_{bs,entrada} - T_{bu,entrada}} \quad (5)$$

onde $T_{bs,saída}$ é a temperatura de bulbo seco na saída do módulo, $T_{bs,entrada}$ é a temperatura de bulbo seco na entrada, $T_{bu,entrada}$ é a temperatura de bulbo úmido na entrada e \mathcal{E} é a eficiência do módulo evaporativo.

O sistema evaporativo será capaz de insuflar uma vazão máxima de 12000 m³/h a ser distribuída entre os cinco ambientes com um aumento de pressão de 200 Pa e os mesmos parâmetros de desempenho dos ventiladores dos *fancoils*.

A modelagem da climatização evaporativa foi introduzida no programa por meio da interface apresentada na Figura 15. A simbologia utilizada na interface gráfica é mostrada na Figura X.

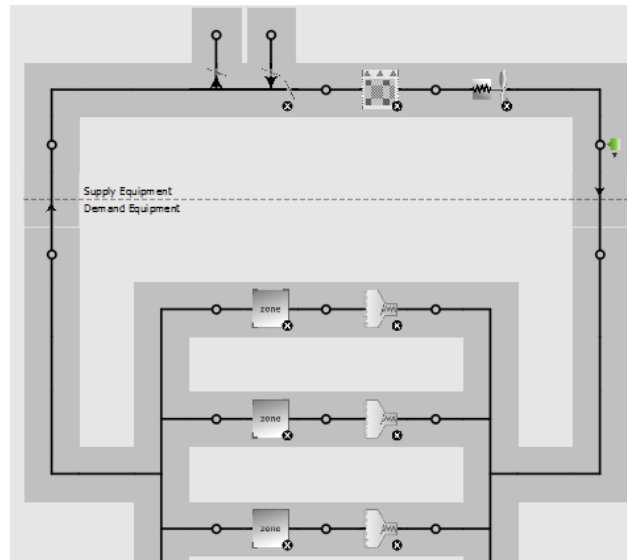


Figura 15: Modelagem do sistema evaporativo no *OpenStudio*

Tabela 6: Simbologia utilizada pelo *OpenStudio* para o sistema de climatização evaporativa

	Módulo de resfriamento evaporativo
	Módulo ventilador com velocidade variável do resfriamento evaporativo
	Terminal de ar com volume de ar variável (VAV) sem reaquecimento
	Zona térmica climatizada
	Sensor de temperatura do ar

Conforme apresentado na Figura 16, a implementação do sistema evaporativo resulta numa queda de até 3°C na temperatura do laboratório do piso superior para o dia crítico de projeto, quando comparado ao comportamento do mesmo ambiente em evolução livre.

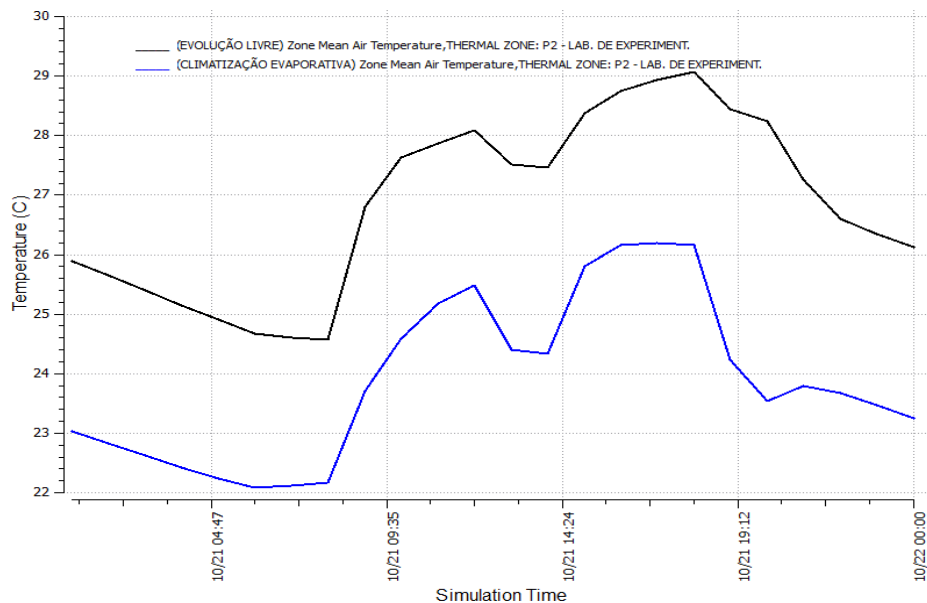


Figura 16: Evolução da temperatura do laboratório no dia de projeto com e sem a climatização evaporativa

A análise anual do conforto térmico por meio do PMV nesse mesmo ambiente é apresentada na Figura 17. Observa-se que o conforto não pode ser garantido somente por meio do sistema evaporativo. Entre os meses de maio e setembro, é visível a maior capacidade do sistema de melhorar as condições de conforto. O comportamento mais eficiente do sistema nesses meses é resultado da baixa umidade relativa do ar, o que aumenta a capacidade do sistema de reduzir a temperatura do ambiente.

Na Figura 18, o PMV para o laboratório do segundo piso é novamente apresentado, mas dessa vez em comparação com o comportamento entre o ambiente com e sem a climatização evaporativa, evidenciando que apesar de não levar a uma condição de conforto satisfatória, o sistema ameniza o calor no interior do local.

Em virtude de um conforto térmico insatisfatório com a utilização isolada do sistema evaporativo, propõe-se o a utilização de um resfriamento geotérmico do ar antes do sistema evaporativo. Dessa maneira, o ar sofrerá um pré-resfriamento passando por um trocador de calor com o solo e em seguida terá uma nova queda de temperatura causada pelo módulo evaporativo. A abordagem sobre o sistema de resfriamento geotérmico é apresentada na próxima seção.

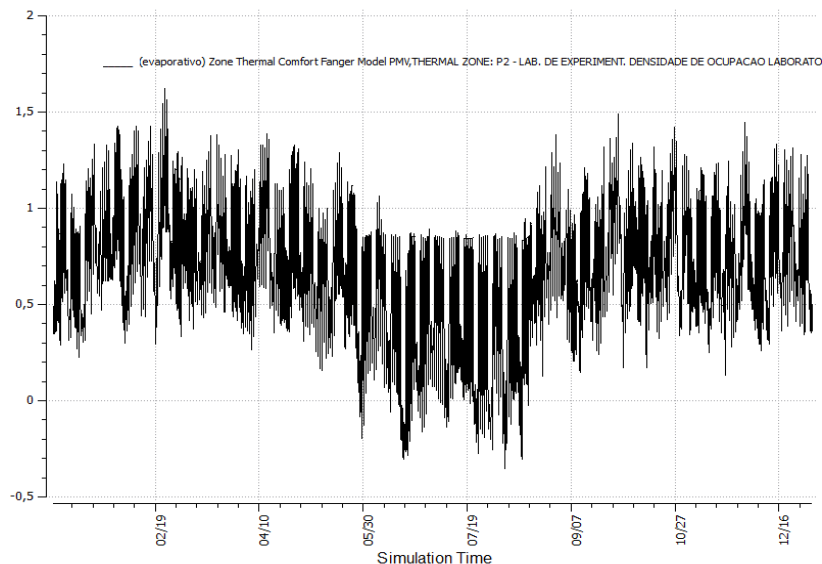


Figura 17: Perfil anual do PMV para o laboratório do segundo piso com climatização evaporativa

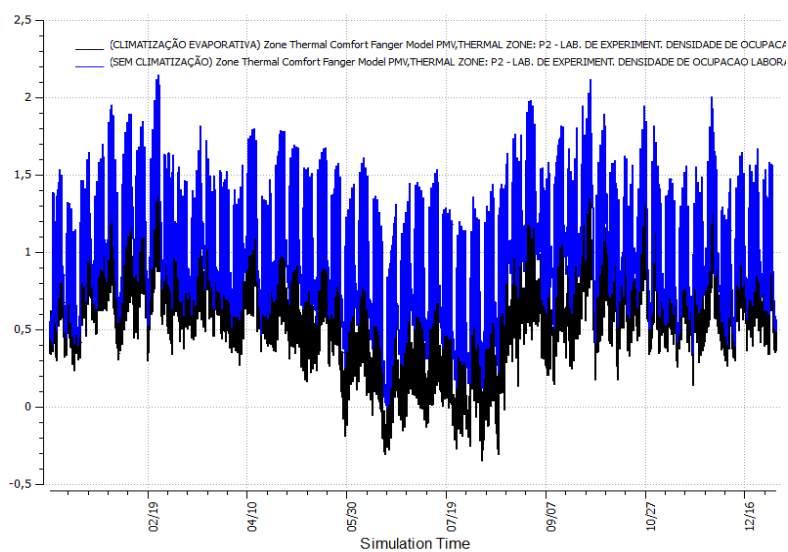


Figura 18: Perfil do PMV para o laboratório segundo piso com e sem climatização evaporativa

4.3 Poço Provençal

Poço provençal ou poço canadiano é o nome dado a um permutador de calor composto por um ou mais dutos de ar subterrâneos que devem trocar calor do ar exterior com o solo no intuito de auxiliar na climatização de ambientes.

A diferença entre os termos canadiano ou provençal decorre de que poço canadiano é normalmente empregado para aquecer o ar, enquanto que poço provençal tem o objetivo de arrefecer o ar. No entanto,

um mesmo poço pode funcionar tanto para o arrefecimento quanto para o aquecimento, dependendo do horário e época do ano em que é empregado.

O sistema tem por finalidade amortecer as amplitudes térmicas, atrasar os picos de temperatura e levar o ar para insuflamento a uma temperatura próxima à do solo, que normalmente é mais agradável do que a temperatura exterior. Características dimensionais do sistema determinam qual o impacto da passagem do ar pelo poço na da temperatura.

Pretende-se utilizar o poço para pré-arrefecer o ar antes de passar pelo módulo evaporativo.

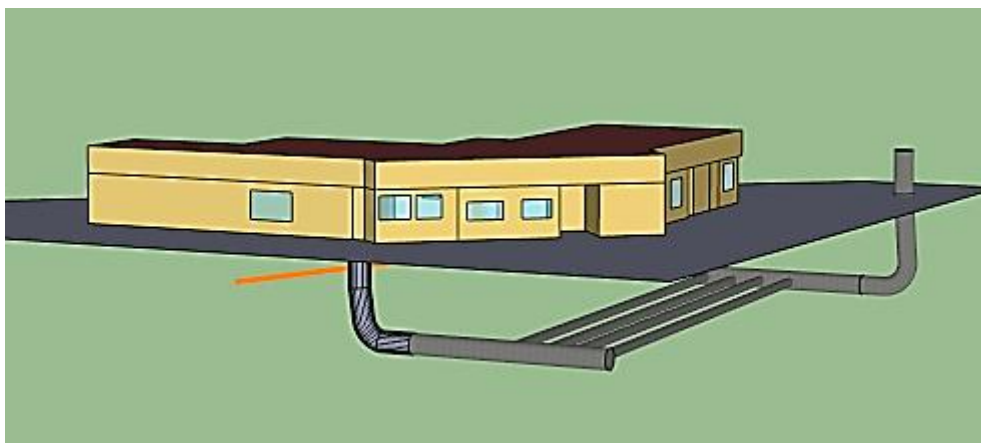


Figura 19: Desenho esquemático de Poço Canadiano em Edificação

Foi adotada uma metodologia simplificada para o dimensionamento preliminar do poço canadiano buscando uma análise rápida das configurações iniciais do sistema. O procedimento foi elaborado por meio das correlações de transferência de calor utilizando-se da analogia reo-elétrica apresentadas por Incropera, et al. (2008) e Fernandes, et al. (2008) para escoamentos internos em tubos circulares.

O dimensionamento simplificados levou em conta quatro análises diferenciadas:

1. Comportamento térmico do solo;
2. Transferência de calor entre o solo e o ar interior ao duto;
3. Diferença de pressão necessária entre a entrada e a saída dos dutos;
4. Medidas de controle da condensação no interior dos dutos.

Com os resultados obtidos por meio da metodologia simplificada, foi possível introduzir um modelo de poço canadiano no software de análise energética utilizado. As próximas seções tratam da elaboração do modelo matemático simplificado e a última seção apresenta a simulação do poço por meio do software de análise térmica *EnergyPlus*, que também será utilizado nas outras análises desse trabalho.

4.3.1 Modelagem do comportamento térmico do solo

Duas modos de análise são possíveis para o solo onde deverá ser implementado o poço: modelagem numérica ou analítica; ou uma modelagem experimental. Em ambos os casos, pretende-se determinar o perfil de temperaturas do solo em função da sua profundidade da época do ano e do horário.

A análise analítica do comportamento térmico do solo deve contemplar as trocas de calor que entre o solo e o ambiente exterior pelos seguintes meios:

- Convecção: O ar troca calor ao escoar pela superfície do solo. O regime pode ser de convecção natural ou forçada, dependendo da presença de ventos no local.
- Radiação: Duas trocas principais por radiação devem ser avaliadas. A primeira é a incidência de radiação solar sobre o solo. A segunda é a troca de calor entre o solo e o céu, principalmente nos dias com baixa nebulosidade.
- Troca latente: A evaporação da água presente no solo intensifica as perdas de calor do solo para o ar.

Cada um desses estudos devem ser executados verificando o seu impacto em cada período do ano, conforme as diversas horas do dia e profundidades possíveis de implementação do poço.

Diversos métodos estão presentes na bibliografia para análise teórica do comportamento térmico do solo considerando as trocas acima citadas.

A modelagem experimental consiste em medir a temperatura do solo por meio de um termômetro de solo ao longo de um ano, construindo uma base de dados a ser utilizada para a modelagem do poço.

Nesse trabalho, estimou-se uma temperatura média do solo em 20°C por meio do programa *CalcSoilSurfTemp* mostrado na Tabela 18, que é acoplado ao software de análise energética *EnergyPlus*. Por meio do arquivo climático local e da definição do tipo de solo e sua superfície, o software estima a temperatura média do solo e a sua amplitude térmica. Esses dados são destinados para uso no *EnergyPlus* que calcula o perfil de temperatura conforme a profundidade do solo.

As configurações do solo no programa foram definidas para:

- tipo de solo: denso e úmido
- tipo de superfície: coberta e úmida.

Essas configurações otimizam a transferência de calor do sistema e deverão ser consideradas na ocupação do solo nas proximidades do edifício. Sugere-se que seja criado uma condição adequada de arborização nos arredores do edifício que promovam além do sombreamento do solo, condições otimizadas também para a convivência local.

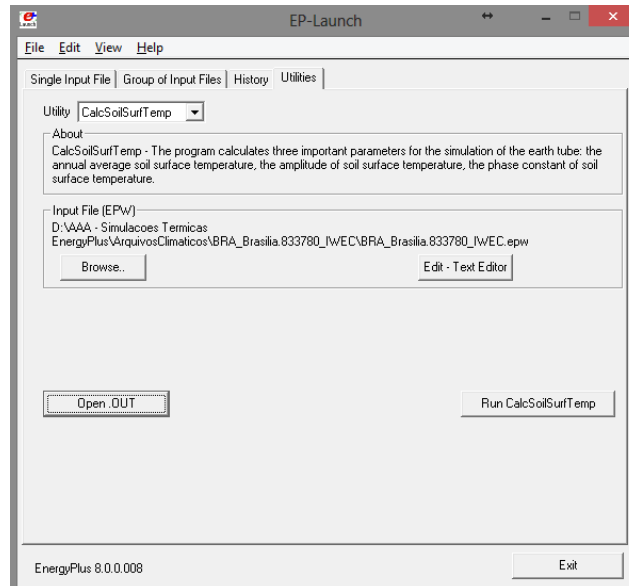


Figura 20: Interface do *EnergyPlus* para uso do *CalcSoilSurfTemp*

4.3.2 Modelagem matemática da transferência de calor entre o solo e o ar

A transferência de calor que ocorre no ar que circula interior ao duto é caracterizada por um regime de convecção forçada porque a diferença de pressão entre a saída e a entrada dos dutos irá induzir um escoamento.

No dimensionamento do duto de ar, duas abordagens são possíveis:

1. determinar o comprimento dos dutos para uma variação de temperatura do ar especificada?
2. ou dada uma temperatura de entrada e as dimensões dos dutos, quais as condições de saída do ar

Para tal, importante se faz um bom entendimento sobre o processo de transferência de calor fruto da convecção forçada no interior de tubos e da condução.

Programas comerciais e metodologias complexas estão disponíveis especificamente para o dimensionamento de poços canadinos. Poder-se-ia fazer uso de tais metodologias ou programas, mas prefere-se o desenvolvimento de um modelo matemático próprio, a partir das correlações de transferência de calor no interior de tubos, com o objetivo de se ter uma estimativa inicial das condições de operação do poço. Posteriormente, recomenda-se um novo dimensionamento do sistema com um programa já existente e que os parâmetros do dimensionamento por essa nova metodologia seja comparados com os resultados obtidos na execução da metodologia abaixo apresentada.

4.3.2.1 Transferência de calor por convecção – Cálculo da resistência térmica

O processo de convecção no interior de tubos deve ser separado entre laminar e turbulento. Mais além, existe a necessidade de se separar as regiões do escoamento entre: região de entrada e região com escoamento completamente desenvolvido.

A determinação do regime do escoamento é avaliada de imediato pelo número de Reynolds, fornecido pela expressão,

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (6)$$

onde,

ρ massa específica do fluido, no caso em estudo do ar [kg/m³]

u_m velocidade média do fluido na seção transversal [m/s]

D diâmetro do tubo [m]

Em um escoamento completamente desenvolvido, o número de Reynolds crítico que corresponde ao surgimento de turbulência, é:

$$Re_{D,c} \approx 2300 \quad (7)$$

Dado que a presença da turbulência intensifica a transferência de calor, as dimensões e condições de operação do sistema serão condicionadas a forçar um escoamento turbulento e as próximas correlações serão desenvolvidas somente para essa condição.

Determina-se o comprimento da região de entrada fluidodinâmica do escoamento, representado por L_t , por meio de,

$$(L_t)_{lam} = 0,05 D Re_D Pr \quad (8)$$

$$(L_t)_{turb} = 10 D \quad (9)$$

A região de entrada do escoamento caracteriza um regime em que o perfil de temperaturas ainda está por se desenvolver ao longo do duto. Ao fim do comprimento de entrada, tem-se um escoamento com perfil de temperaturas fixo. Essa distinção é importante porque altera o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção.

A determinação das propriedades físicas do fluido utilizadas no cálculo do comprimento de entrada, como o número de *Prandtl* e outras que aparecerão adiante, dependem da temperatura do fluido. Dado que a temperatura do fluido se altera radialmente e axialmente ao longo do duto, define-se como temperatura do filme a temperatura para a qual as propriedades do fluido são determinadas. A temperatura do filme é uma média entre a temperatura média do fluido e a médias da temperaturas da superfície interna do tubo, resultando na expressão,

$$T_{filme} = \frac{\bar{T}_p + \bar{T}_m}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (10)$$

em que T_p é a média da temperatura da superfície do duto entre o seu início e o seu fim,

$$\bar{T}_p = \frac{\bar{T}_{pe} + \bar{T}_{ps}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (11)$$

e T_m é a média aritmética das temperaturas de entrada e saída do fluido no duto,

$$\bar{T}_m = \frac{\bar{T}_e + \bar{T}_s}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (12)$$

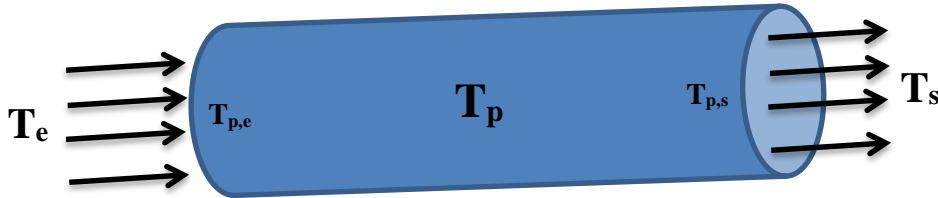


Figura 21: Diagrama esquemático do duto com as temperaturas de entrada, saída e da parede

Conhecida a temperatura do filme, calcula-se o número de *Nusselt* e o coeficiente de transferência de calor por convecção. A determinação do número de *Nusselt* envolve a estabelecimento de uma condição de fronteira: ou a temperatura da parede do duto, ou a taxa de transferência de calor devem ser admitidas constantes. No cálculo de poços canadinos, admitiremos constante a temperatura da parede de uma camada de terra que envolve o duto, porque considera-se que a terra estabelece um equilíbrio de temperatura após um certo período de regime transiente.

Dessa forma, o número de *Nusselt* para escoamentos turbulentos em tubos de seção circular com temperatura da parede constante é obtido pelas expressões da Tabela 7.

O conhecimento do número de *Nusselt* permite a determinação do coeficiente médio de transferência de calor por convecção,

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{Nu} \lambda}{D} \quad \left[\frac{W}{m^2k} \right] \quad (13)$$

Com coeficiente médio de transferência de calor por convecção, determina-se uma resistência de convecção com,

$$R_{cv} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{cv} * A} \quad \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (14)$$

em que a área A , é a área interna do cilindro dada pelo produto do perímetro da circunferência que delimita o duto pelo comprimento do duto,

$$A = 2 \pi r_{int} L \quad [m^2] \quad (15)$$

Tabela 7: Correlações do número de *Nusselt* para Escoamentos Turbulentos (Fernandes, et al., 2008)

Escoamentos turbulentos Zona de entrada ($T_p = C^{te}$) ou ($\dot{q}_p = C^{te}$)	Escoamentos turbulentos Zona desenvolvida ($T_p = C^{te}$) ou ($\dot{q}_p = C^{te}$)
$10 < L/D_i < 400$ $Nu_D = 0,036 Re_{D_h}^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{0,055} \quad (12.4)$	$0,7 < Pr < 160; Re_D \geq 10^4; L/D_i \geq 10$ $Nu_D = 0,023 Re_{D_h}^{0,8} Pr^n \quad (12.5)$ <p>$n = 0,3$ Arrefecimento $n = 0,4$ Aquecimento</p>
	<p>Para os escoamentos onde ocorrem variações sensíveis das propriedades dos fluidos: $0,7 < Pr < 16700; Re_D \geq 10^4; L/D_i \geq 10$</p> $Nu_D = 0,027 Re_{D_h}^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (12.6)$ <p>A viscosidade dinâmica (μ_m) é determinada para a temperatura média do fluido, e (μ_p) e para a temperatura da parede. As restantes propriedades são determinadas à temperatura do filme.</p>

4.3.2.2 Transferência de calor por condução – Cálculo da resistência térmica

Deve-se proceder agora ao cálculo das resistências térmicas por condução referentes ao duto e à parte da camada do solo que tem a sua temperatura influenciada pela troca de calor com o duto. As duas resistências devem ser associadas em série para a construção de uma resistência por condução equivalente, conforme apresentado no digrama Figura 22.

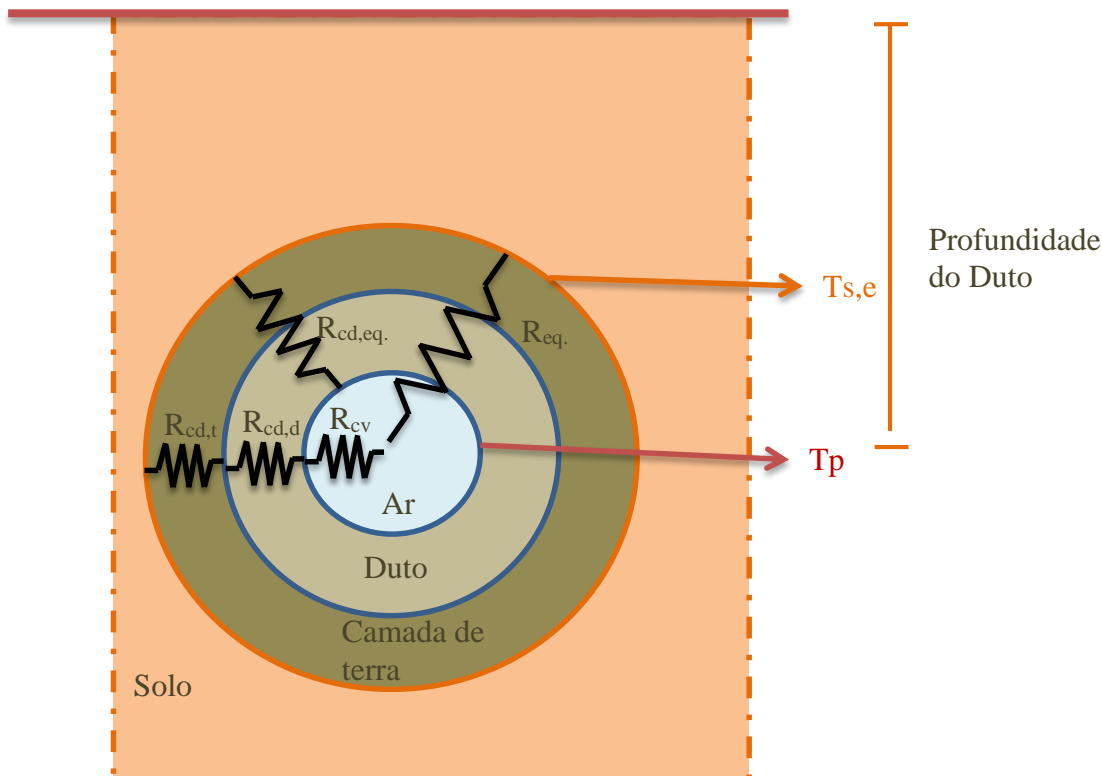


Figura 22: Diagrama esquemático do duto em corte e camada de exterior de terra

A resistência térmica de condução em uma parede cilíndrica é avaliada por,

$$R_{cd,cil} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2 \pi \lambda L} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (16)$$

onde,

r_{ext} é o raio exterior

r_{int} é o raio interior

λ é a condutibilidade térmica do material constituinte do duto

L é o comprimento do duto

Na Tabela 8 são apresentadas algumas condutibilidades térmicas de materiais possíveis para a constituição de poços. Apresenta-se também a condutibilidade para alguns tipos de solo, de modo a possibilitar análises de sensibilidade da taxa transferência de calor e do comprimento necessário do poço em função do material constituinte do poço e do local de instalação.

Tabela 8: Condutibilidades térmicas médias de alguns materiais

Material	Condutibilidade Térmica (λ) $\left[\frac{W}{m \cdot ^{\circ}C} \right]$
Aço	50
Alumínio	237
Cobre	401
Ferro	80
Fibra de Vidro	0,03
Plástico (Polipropileno)	0,25
PVC	0,20
Solo florestal	0,8
Solo de argila arenosa	0,9
Solo arenoso úmido	2,0
Solo seco	0,3

4.3.2.3 Resistência equivalente

As resistências de condução e de convecção das zonas de entrada e desenvolvida do escoamento devem resultar em uma resistência equivalente por meio de uma associação em série.

$$R_{equiv,entrada} = R_{cd,entrada} + R_{cv,entrada} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (17)$$

$$R_{equiv,desenvolvida} = R_{cd,desenvolvida} + R_{cv,desenvolvida} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (18)$$

As resistências equivalentes da zona de entrada e à zona desenvolvida devem ser associadas em paralelo, resultando na resistência equivalente do duto, que irá compor o cálculo da taxa de transferência de calor da terra para o ar que escoar no interior.

$$R_{equivalente} = \frac{R_{equiv,entrada} * R_{equiv,desenvolvida}}{R_{equiv,entrada} + R_{equiv,desenvolvida}} \quad \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (19)$$

4.3.2.4 Taxa de transferência de calor e temperatura de saída do ar

Conforme o ar escoar ao longo do duto, a temperatura corrente livre do fluido se altera de forma exponencial ao longo do seu percurso. À vista disso, pode-se definir a taxa de transferência de calor como,

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{ml}}{R_{equivalente}} \quad [W] \quad (20)$$

em que:

ΔT_{ml} é a média logarítmica das diferenças de temperatura ao longo do duto dada por,

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{saída} - \Delta T_{entrada}}{\ln(\Delta T_{saída} / \Delta T_{entrada})} \quad [^{\circ}C] \quad (21)$$

Os elementos $\Delta T_{saída}$ e $\Delta T_{entrada}$ são as variações entre a temperatura $T_{s,e}$ na superfície exterior do duto (considerando a envoltória de terra), e a temperatura média do fluido, conforme as expressões abaixo,

$$\Delta T_{saída} = T_{s,e} - T_{m,saída} \quad (22)$$

$$\Delta T_{entrada} = T_{s,e} - T_{m,entrada} \quad (23)$$

$T_{s,e}$ é admitida constante e considerada como a temperatura do solo à uma distância fora da influência do duto, já que o solo aquecido ao redor do duto tem a sua resistência térmica também considerada na análise por condução.

Finalmente, a temperatura média de saída do ar ao fim do duto pode ser obtida resolvendo a expressão abaixo para $T_{m,sai}$,

$$\frac{\Delta T_{saída}}{\Delta T_{entrada}} = \frac{T_{s,e} - T_{m,saída}}{T_{s,e} - T_{m,entrada}} = \exp\left(-\frac{1}{\dot{m}c_p R_{equivalente}}\right) \quad (24)$$

Um processo iterativo é necessário para desenvolver corretamente o método apresentado, porque o cálculo da temperatura do filme, necessário para a determinação das propriedades do fluido em 4.3.2.1, envolve o conhecimento da temperatura de média de saída do fluido, determinada somente ao fim do dimensionamento.

A planilha de cálculo apresentada na , com valores hipotéticos, possibilita a resolução rápida do método apresentado.

Tabela 9: Planilha de dimensionamento para Poços Canadianos

DIMENSIONAMENTO DE POÇO CANADIANO			
Parâmetros de Entrada			
Propriedades do Solo:	$T_{\text{SOLO}} =$	18	°C
	$\lambda_{\text{SOLO}} =$	0,3	W/m °C
	$e =$	0,2	m
Propriedades do Fluido (Ar):	$T_{\text{entrada}} =$	30	°C
Vazão Total de Ar:	$Q =$	900	m ³ /h
Número de Dutos:	$n =$	3	
Propriedades do duto:	$\lambda_{\text{DUTO}} =$	0,2	W/m °C
	$D_i =$	0,3	m
	$D_e =$	0,35	m
	$L =$	50	m

Hipóteses Simplificativas:			
Temperatura média da parede:	$T_p =$	23,7	°C
Temperatura de saída do fluido:	$T_s =$	22,9	°C

Resultados:			
Temperatura na saída	$T_{m,\text{saí}} =$	22,9	°C
Potência Térmica TOTAL retirada	$Pot =$	-2152,0	W

Alguns softwares já incorporam o dimensionamento de trocadores de calor geotérmicos em seus pacotes. O software de análise energética de edificações *EnergyPlus* traz um pacote de cálculo, o *Earthtube*, para análise desse tipo de solução. Já o GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern – Desenho gráfico de permutadores de calor), software criado na Universidade de Siegen, na Alemanha, é específico para o dimensionamento de permutadores de calor ar solo, proporcionando uma análise individualizada do sistema.

4.3.3 Análise do poço provençal por meio do *EnergyPlus*

Da metodologia simplificada apresentada nas seções anteriores, foi possível pré-dimensionar um modelo de poço provençal para ser simulado no software de análise termoenergética utilizado para as simulações do edifício: o *EnergyPlus*. A Figura 23 mostra a interface do *EnergyPlus* com a configuração do sistema. O módulo do utilizado no programa foi o *ZoneEarthtube*.

As configurações introduzidas no modelo de simulação do poço foram:

- Número de dutos: cinco, sendo um para cada ambiente atendido pelo sistema;
- Comprimento dos dutos: 100 metros cada um;
- Material dos dutos: Aço, de condutividade térmica igual a 80 W/m.K
- Diâmetro dos dutos: 1 metro
- Espessura dos dutos: 5 cm
- Vazão máxima induzida pelo sistema de ventilação de cada duto: 2400 m³/h
- Profundidade de enterramento dos dutos: 4 metros

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Zone Name		Thermal Zone: P1 - Lab. de Experiment.	Thermal Zone: P2 - Lab. de Experiment.	Thermal Zone: P1-Circ. Horiz.	Thermal Zone: P2-Circ. Horiz.	Thermal Zone: P3-Circ. Horiz.
Schedule Name		Poco	Poco	Poco	Poco	Poco
Design Flow Rate	m ³ /s	0,668	0,668	0,668	0,668	0,668
Minimum Zone Temperature when Cooling	C	-10	-10	-10	-10	-10
Maximum Zone Temperature when Heating	C	50	50	50	50	50
Delta Temperature	deltaC	0	0	0	0	0
EarthTube Type		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa	200	200	200	200	200
Fan Total Efficiency		0,6045	0,6045	0,6045	0,6045	0,6045
Pipe Radius	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pipe Thickness	m	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
Pipe Length	m	200	200	200	200	200
Pipe Thermal Conductivity	W/m-K	80	80	80	80	80
Pipe Depth Under Ground Surface	m	4	4	4	4	4
Soil Condition		HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp
Average Soil Surface Temperature	C	23,29932785	23,29932785	23,29932785	23,29932785	23,29932785
Amplitude of Soil Surface Temperature	C	5,20856142	5,20856142	5,20856142	5,20856142	5,20856142
Phase Constant of Soil Surface Temperature	days	115	115	115	115	115
Constant Term Flow Coefficient		0,606	0,606	0,606	0,606	0,606
Temperature Term Flow Coefficient		0,02019999	0,02019999	0,02019999	0,02019999	0,02019999
Velocity Term Flow Coefficient		0,00059800001	0,00059800001	0,00059800001	0,00059800001	0,00059800001
Velocity Squared Term Flow Coefficient		0	0	0	0	0

Figura 23: Configuração do poço provençal no EnergyPlus

Os resultados apontaram para uma redução de até 5°C entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do ar depois do ar passa pelo trocador de calor com o solo, conforme mostram os perfis de temperatura para o dia de projeto na Figura 24.

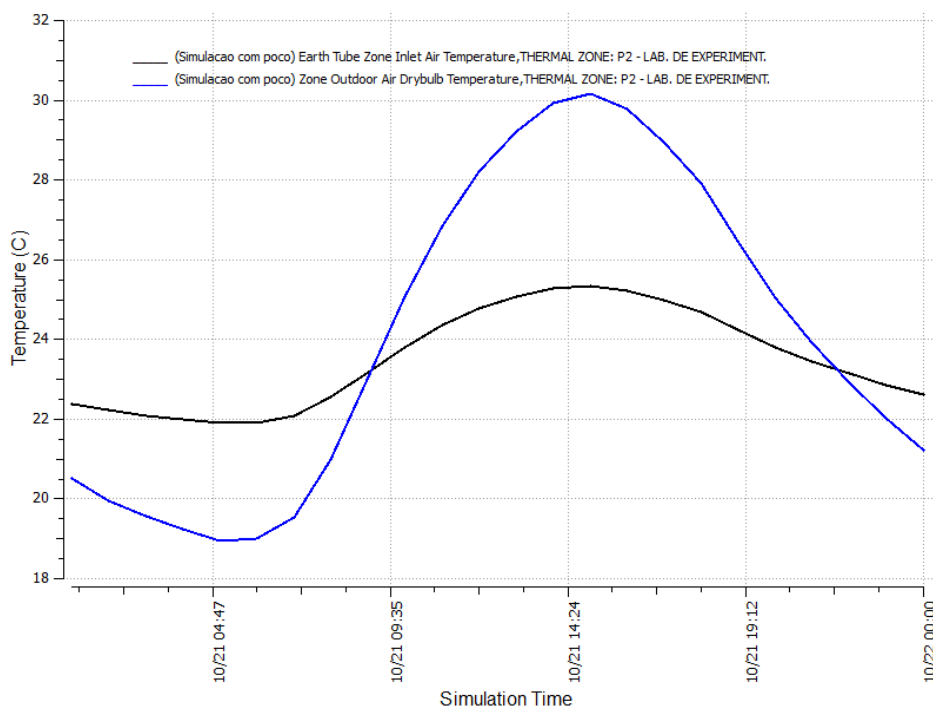


Figura 24: Comparação entre a temperatura do ar exterior e temperatura do ar após passar pelo poço provençal

Do resultado, conclui-se que o resfriamento geotérmico é vantajoso para a climatização do edifício em questão, mas não é suficiente se utilizado de forma isolada, visto que, apesar de reduzir a temperatura do ar exterior, não é útil ao ponto de levar o ar para uma condição de conforto nas horas críticas de

projeto. Portanto, mister se faz utilizar o sistema de resfriamento geotérmico acoplado a outro mecanismo de climatização.

Propõe-se acoplar a saída dos dutos enterrados à entrada do módulo evaporativo, de forma que o ar ao sofrer o seu pré-resfriamento pelo sistema geotérmico, será novamente resfriado pelo módulo evaporativo, atingindo a condição ideal de insuflamento.

4.4 Chaminé Térmica

Chaminé térmica é um dispositivo que tem por finalidade melhorar a ventilação de ambientes por meio do aumento da ventilação natural no interior do edifício. O aquecimento do ar em um canal confinado da chaminé, causa uma diferença na sua massa específica e o consequente deslocamento da massa de ar de maneira ascendente, forçando a entrada de massa de ar do interior da edificação a ser conduzida ao exterior pelo dispositivo.

Esses sistemas têm sido usados com sucesso em edifícios de tamanho variado, chegando até mesmo a atender grandes edifícios comerciais (US Department of Energy, 2013).

O ar dentro da chaminé é aquecido naturalmente usando a radiação solar que, ao atravessar uma placa de vidro, incide sobre uma parede absorvedora que é aquecida e aumenta a temperatura de dentro do canal. O aumento da temperatura resulta numa queda da massa específica do ar que passa a se mover verticalmente, resultando em um gradiente de pressão entre o exterior e o interior do dispositivo. O maior nível de pressão entre o exterior e o interior da chaminé, força uma entrada de ar pela sua parte inferior que é posicionada dentro dos ambientes do edifício a ser climatizado, resultando em uma tiragem de ar de dentro do edifício.

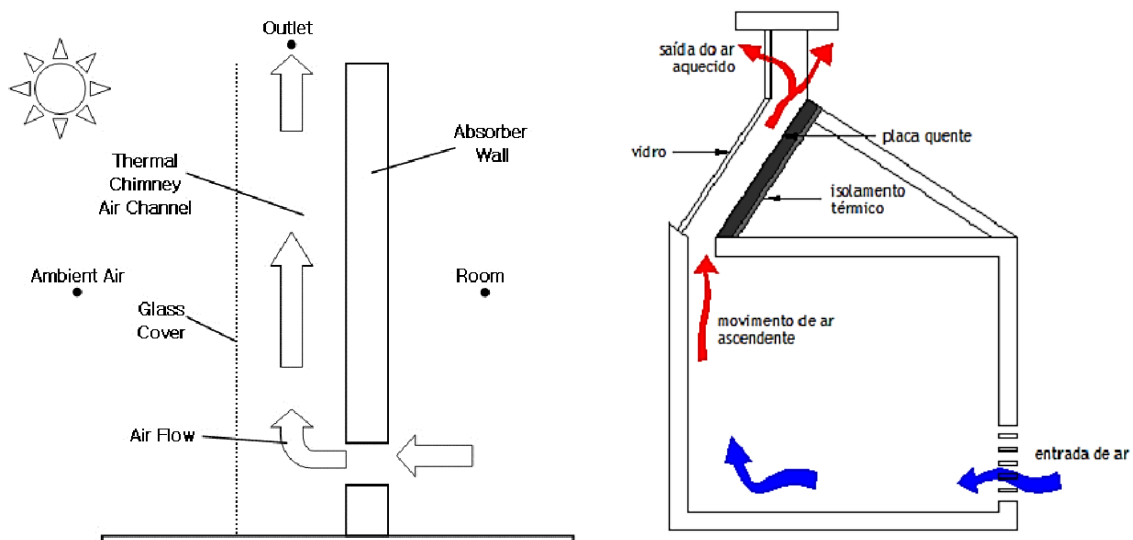


Figura 25: Vistas em corte de duas chaminés térmicas (US Department of Energy, 2013) e (Neves, 2012)

Chaminés térmicas são tipicamente utilizadas em apoio aos sistemas de ventilação natural, quando a temperatura do ar exterior é menor ou igual à temperatura de conforto, de maneira que, o simples insuflamento do ar exterior para dentro do edifício, proporciona condições de conforto térmico.

Nesse cenário, propõe-se uma utilização alternativa da chaminé térmica. A sua função permanecerá de retirar o ar da edificação causando uma depressão no seu interior e induzindo a entrada de ar exterior. No entanto, em troca da entrada de ar ocorrer direto da atmosfera, a queda de pressão no interior deverá forçar uma entrada por meio do poço canadiano que causará a queda de temperatura do ar insuflado.

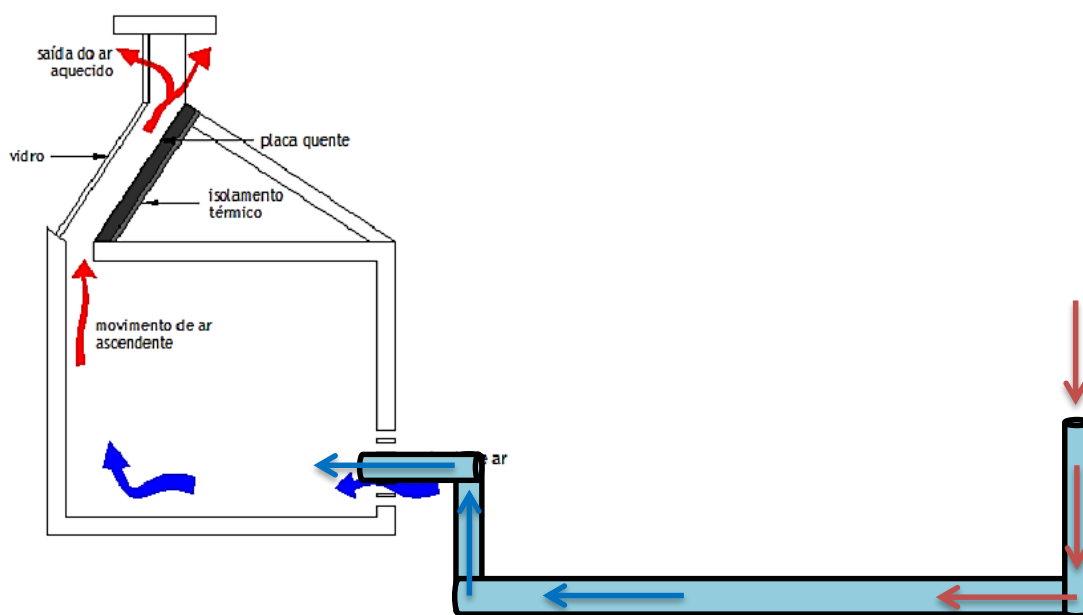


Figura 26: Corte esquemático de edificação com chaminé térmica e poço canadiano

Modelos matemáticos acerca da análise de chaminés térmicas são constituídos, basicamente, por equações de balanço de energia e de cálculo de vazão. No entanto, a resolução do problema é significativamente mais complexa do que a elaborada para poços canadianos em decorrência do maior número de componentes envolvidos nas trocas de calor. Dados climáticos, informações sobre a temperatura da superfície do solo, intensidade e direção dos ventos, intensidade da radiação solar e nebulosidade influenciam diretamente nos cálculos, tornando-os complexos, demorados e imprecisos, caso as informações de entrada não sejam confiáveis. Além disso, a resolução matemática da maioria dos modelos acaba por ser resolvida por diferenças finitas, dificultando uma apresentação resumida nesse texto.

Dada a complexidade do assunto, programas de simulação computacional específicos tem sido desenvolvidos para estimar a vazão proporcionada pelo mecanismo da chaminé térmica. Em outros casos, programas de análise energética de edificações já vem incorporando pacotes de cálculo para essa alternativa.

Atualmente, três modelos de simulação computacional podem ser utilizados na análise da ventilação por intermédio da chaminé térmica (Neves, 2012):

- *Building energy simulation* (BES): utiliza valores pré-estimados para o fluxo de ar;
- *Airflow Network* (AFN): baseia-se no balanço de massas da zona e nas pressões interzonas;
- *Computational Fluid Dynamics* (CFD): parte dos princípios de dinâmica dos fluidos para estimar o comportamento do escoamento e do campo de temperaturas.

O programa *EnergyPlus* possui um pacote de simulação do tipo *Airflow Network* incorporado ao seu método de análise energética.

A análise do *EnergyPlus* procura modelar os efeitos do balanço de calor do ar da chaminé térmica, equilibrar os movimentos do ar causadas pela chaminé, e relatar outras variáveis do sistema apropriadas. O modelo é ligado ao balanço de calor do ar de forma semelhante à infiltração, mas não faz parte de um circuito de ar HVAC.

O modelo matemático utilizado considera a condição de apenas uma entrada de ar na chaminé. No entanto, caso se necessite modelar mais de uma entrada, o próprio programa permite que o usuário especifique um percentual relativo às taxas de fluxo de ar. A temperatura de cada entrada é obtida pelo próprio programa por meio do balanço energético do local de onde a chaminé capta o ar.

A análise e dimensionamento inicial da chaminé proposta serão realizadas por meio de um programa baseado em resultados de simulações do tipo *Airflow Network* do programa *EnergyPlus*.

O software Chaminé, apresentado por Roriz (2010), desenvolvido no âmbito de pesquisa financiada pela FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, adota equações obtidas a partir de análises paramétricas de resultados de centenas de simulações elaboradas no software *EnergyPlus* para estimar o desempenho de uma chaminé térmica segundo o modelo da Figura 27.

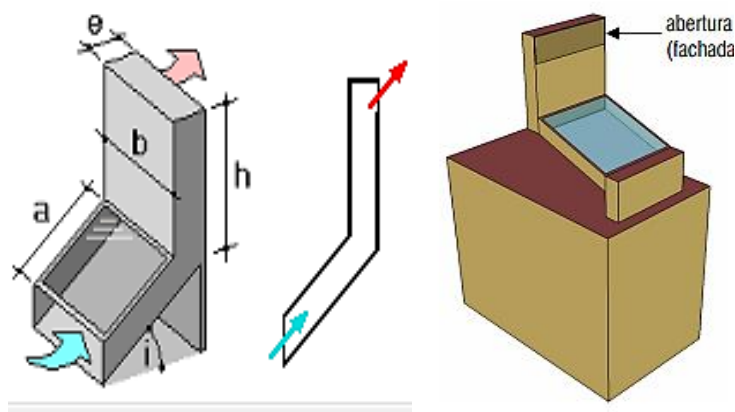


Figura 27: Modelo de chaminé térmica analisado pelo programa Chaminé 1.0

A janela inicial do programa é apresentada na Figura 28 para o melhor entendimento do seu funcionamento. A operação do programa é simples, e deve ser realizada da seguinte maneira:

1. Escolhe-se um local: o programa selecionará automaticamente um arquivo climático do local, apresentando os dados das temperaturas diárias, intensidade e direção dos ventos e intensidade da radiação solar.
2. Seleciona-se um mês de análise: o programa responde com a declinação solar para o dia 15 do mês, um ângulo de inclinação e uma orientação para o coletor em função do sol ou do vento. Importante observar, nessa etapa, que o programa apresenta a restrição de somente orientar o coletor para norte ou para o sul.
3. Especifica-se a inclinação e a orientação do coletor conforme os dados ideais apresentados ou conforme os dados para um outro mês, a fim de se avaliar o comportamento do coletor em condições diferentes das ideais.
4. Escolhe-se as dimensões para a chaminé restritas a:
 - a. Comprimento do vidro: de 1 a 3 m
 - b. Largura do canal: de 1 a 1,5 m
 - c. Espessura do canal: de 10 a 30 cm
 - d. Altura do canal vertical: de 1 a 5 m
5. Escolhe-se a refletância do entorno da chaminé e especifica-se o calculo para situações com ou sem vento.
6. Os dados são apresentados por meio de três gráficos e uma tabela, conforme se observa na Figura 28.

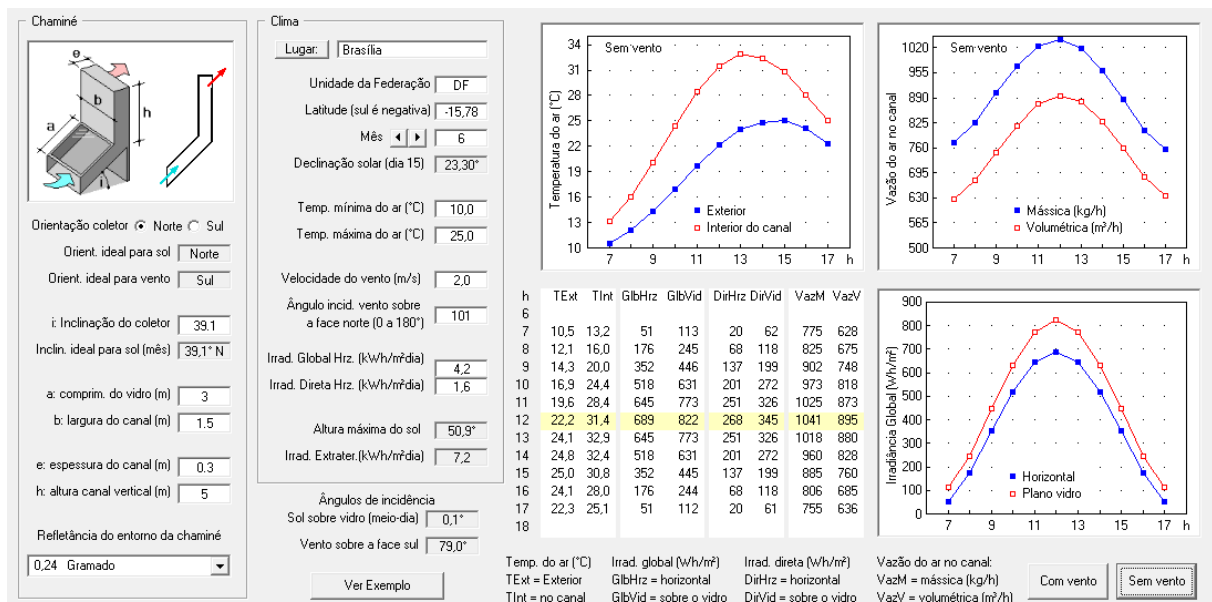


Figura 28: Programa Chaminé

As vantagens e desvantagens do programa são facilmente detectadas e apresentadas abaixo para que a modelagem leve em conta possíveis restrições do software.

- Vantagens:
 1. Não requer um modelo tridimensional do sistema, resultando em um fácil manuseio e economia no tempo da análise;
 2. Variedade de resultados para diversos horários;
 3. Validação experimental realizada em monitoramento de célula de teste na cidade de São Carlos;
 4. Cálculos baseados em resultados de um dos programas de análise energética mais bem conceituados, o *EnergyPlus*;

- Desvantagens
 1. Limitação nas dimensões da chaminé;
 2. Limitação da orientação da chaminé somente entre norte e sul;
 3. Cálculos realizados mensalmente, havendo a necessidade de se realizar 12 novas simulações para cada conjunto de novos parâmetros para avaliar o comportamento da chaminé ao longo de um ano.

Apesar das limitações expostas, o programa se mostra como uma boa alternativa para uma estimativa inicial da chaminé a ser implementada na construção proposta.

O programa Chaminé permitiu um pré-dimensionamento da chaminé a ser utilizada no edifício. Diante das análises realizadas, é proposta a implementação da chaminé térmica na parede voltada para noroeste previamente disponibilizada pelo projeto arquitetônico.

A parede será dotada de um sistema de alta absorção da radiação solar causando a convecção natural do ar e induzindo um escoamento que irá otimizar a ventilação natural dos locais atendidos. A análise e o dimensionamento da chaminé proposta foram integrados no modelo de simulação do *EnergyPlus* por meio do módulo *ZoneThermalChimney*. As hipóteses de cálculo e a configuração da chaminé no *EnergyPlus* são apresentadas na Seção 5.4.4, visto que esse mecanismo faz parte do comportamento térmico do edifício em evolução livre.

5 SIMULAÇÕES TÉRMICAS

5.1 O software de análise

São várias as ferramentas de análise térmica e energética de edifícios. O Diretório de Ferramentas de Simulações Computacionais do Departamento de Energia dos Estados Unidos apresenta uma lista mais de 330 programas de simulação desenvolvidos em diversos países.

Após vasta pesquisa sobre esses softwares, optou-se por utilizar o *EnergyPlus* por ser referência mundial nesse tipo de análise.

O *EnergyPlus* é disponibilizado sem custos pelo Departamento de Energia norte-americano e é muito utilizado para a análise de projetos de alta eficiência. O programa tem capacidade de modelar diversas alternativas de construção e climatização de edifícios, executar modelos de cálculo aprimorados e, conseqüentemente, apresenta alta confiabilidade nos seus resultados. Além disso, as suas capacidades de simulação diferenciada, tais como “*time-step*” de cálculo menor que uma hora, sistemas de condicionamento de ar configuráveis e modelo de condução de calor transiente através dos elementos do prédio, o colocam a frente dos outros softwares similares (LabEEE, 2009).

Outra característica importante do *EnergyPlus* é a sua concepção modular integrando diversas funções de análise complementares. O módulo *Air Flow Network*, por exemplo, permite a modelagem da ventilação natural que foi utilizada nesse trabalho. Já o módulo *Zone Thermal Chimney*, avalia a operação de uma chaminé térmica e o seu impacto no comportamento térmico das zonas do edifício. Muitos outros módulos trazem funções auxiliares que permitem uma aproximação confiável da condição de operação de um edifício real.

No entanto, o *EnergyPlus* é apenas um motor de cálculo, pois não inclui uma interface de usuário no seu pacote. Isso significa que, caso não se utilize uma interface gráfica acoplada, todos os componentes do edifício, das paredes aos sistemas de climatização, devem ser escritos em um arquivo de texto ou em um editor básico de informações, o que é completamente inviável no caso da atual de abordagem.

Portanto, é quase que essencial a adoção de um programa complementar para realizar as entradas principais da simulação. Esse programa é comumente chamado de Interface Gráfica de Usuário (GUI) (University of Illinois, 2010).

A Interface Gráfica de Usuário adotada na simulação foi o programa *OpenStudio*, disponibilizado livremente pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). O *OpenStudio* traz grande parte das funções do *EnergyPlus* já incluídas na sua interface, mas alguns pacotes ainda não estão incorporados e, caso se precise utilizar tais pacotes, é necessário exportar o arquivo do *OpenStudio* para fazer a introdução desses módulos diretamente no *EnergyPlus*. Veremos mais à frente que foi necessário

introduzir os parâmetros da ventilação natural e da chaminé térmica diretamente no *EnergyPlus*, uma vez que o *OpenStudio* ainda não trabalha com os módulos que simulam essas funções.

Além do *EnergyPlus* e do *OpenStudio*, utilizou-se também o programa *Google SketchUp* para introduzir os parâmetros da envoltória do edifício. Isso foi possível porque além de ser um programa a parte, o *OpenStudio* também é um plugin para o *Google SketchUp*.

Diante do abordado, considera-se que a simulação foi realizada em um dos melhores softwares até hoje já desenvolvidos para análise do comportamento termoenergético de edifícios.

5.2 Objetivo

Uma simulação termoenergética de um edifício nZEB tem quatro objetivos principais:

1. Analisar o conforto térmico em evolução livre;
2. Otimizar as características construtivas;
3. Calcular a carga térmica e;
4. Estimar o consumo de energia anual do edifício.

A análise do conforto térmico inicia-se com a simulação do edifício em evolução livre, ou seja, sem a presença de nenhum sistema de climatização ativo. Dessa maneira, pretende-se avaliar o conforto térmico em cada tipo de ambiente, identificar possíveis condições que o estejam desfavorecendo e otimizar tais condições com o objetivo de se alcançar a melhor situação possível dentro do edifício.

Após a análise de conforto, se a mesma apontar para períodos desconfortáveis ao longo do ano, a simulação tem por finalidade calcular a potência térmica necessária para que um sistema de climatização mantenha as condições de conforto térmico interiores dentro dos limites estabelecidos em norma.

Após o cálculo da carga térmica e escolha da solução de climatização a ser adotada, deve-se incluir os equipamentos de climatização escolhidos e simular novamente o edifício para analisar o consumo de energia ao longo do ano. Novamente são possíveis otimizações, agora com o objetivo de reduzir o consumo final de energia.

5.3 Metodologia

A metodologia utilizada para atingir os objetivos acima expostos foi dividida em 8 partes abaixo descritas:

- 1) Introduziu-se no *EnergyPlus* o modelo inicial do edifício proposto.
- 2) O modelo introduzido foi submetido inicialmente à Simulação Térmica em evolução livre, com o uso de ventilação natural em todas as janelas e portas durante todas as horas do ano. O conforto

térmico foi analisado por meio do comportamento do PMV para cada uma das zonas térmicas. As zonas térmicas que apresentaram perfis semelhantes de alteração do PMV foram agrupadas.

- 3) Ativando a ferramenta *Ideal Air Loads*, calculou-se a carga térmica inicial com os termostatos de arrefecimento configurados para 23°C. Esse recurso, além de fornecer a potência térmica necessária para o equipamento de climatização de cada ambiente, também informa o consumo de energia térmica gasta com a climatização ao longo de um ano típico, fruto da integração da carga térmica ao longo do ano. Importante salientar que a energia térmica gasta com a climatização não é numericamente igual à energia elétrica consumida para tal fim, visto que essa relação depende da performance do equipamento para cada condição de carga térmica.
- 4) Com a carga térmica de cada espaço e o consumo de energia térmica, otimizações foram introduzidas na simulação térmica, modificando o modelo inicialmente proposto. Os impactos de cada modificação na carga térmica e no consumo foram analisados isoladamente e em conjunto. As alterações que apresentaram reduções consideráveis no consumo de energia e na carga térmica, passaram a fazer parte do modelo definitivo.
- 5) Ajustou-se os termostatos buscando atender aos limites de PMV adotados em norma para que haja conforto térmico ($0,5 \leq \text{PMV} \leq 0,5$).
- 6) Incluiu-se na análise as soluções de climatização que atenderiam às necessidades do edifício e o consumo anual de energia foi estimado.

5.4 Modelagem e configuração do *EnergyPlus*

5.4.1 Arquivo Climático

O arquivo climático utilizado nas simulações realizadas no *EnergyPlus* é o disponibilizado pela *Intenational Weather for Energy Calculations* (IWEC) e recomendado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE). Os arquivos IWEC são resultado de dezoito anos de obtenção de dados climatológicos originalmente arquivados no *National Climatic Data Center* dos Estados Unidos. Os arquivos são complementados pelas radiações solares estimadas em intervalos horários baseados na geometria entre o Sol e a Terra e nas variações climáticas horárias, particularmente nas informações de nebulosidade (U.S. DOE).

Os arquivos IWEC contém os dados climáticos em intervalos horários para um ano típico. Os dados são resultado do processamento de informações climáticas de 18 anos (1982-1999), em que informações distorcidas são desconsideradas e a radiação solar é calculada. Num segundo momento, 12 Meses Meteorológicos Típicos são selecionados e associados para constituir o Ano Meteorológico Típico e (U.S. DOE).

O dimensionamento dos sistemas foi realizado por meio da consideração de um dia de projeto que atenda a 98% das condições climáticas críticas observadas nos dados meteorológicos. Os parâmetros climáticos utilizados para a configuração do dia de projeto são disponibilizados pela ABNT NBR16.401-Parte 1 e apontados nos seguintes tópicos:

- Latitude: 15,87° S
- Longitude: 47,93° W
- Altitude: 1061 m
- Pressão Atmosférica: 89,21 kPa
- Período de referência: 1982 a 2001
- Frequência anual: 2%
- Temperatura de bulbo seco: 30,2 °C
- Temperatura de bulbo úmido coincidente: 18,6 °C

5.4.2 Envoltória, Sombreamentos e Divisões Internas

Numa primeira abordagem, três envoltórias hipotéticas foram analisadas com o objetivo de dar um *feedback* de qual forma seria melhor para a equipe do projeto arquitetônico. Os resultados e análise dessas três geometrias podem ser verificados no Anexo 9.2. Os resultados apontaram para a escolha da geometria B, que foi então adotada como base para a elaboração do projeto arquitetônico atual.

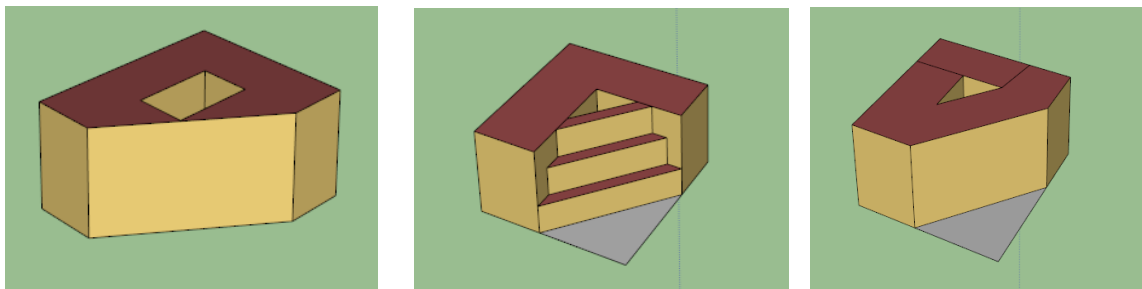


Figura 29: Envoltória modelada das geometrias A, B e C no *Google SketchUp*

Do projeto arquitetônico apresentado no Capítulo 3, foi modelada a edificação no *Google SketchUp* com o auxílio do plugin *OpenStudio* para transformar o desenho gráfico em linguagem do *EnergyPlus*.

A Figura 30, apresenta o modelo tridimensional apresentado pela arquitetura. A Figura 31, mostra o mesmo modelo inserido na plataforma *OpenStudio*. Por fim, a Figura 32, mostra a resposta do *EnergyPlus*, confirmando que a envoltória introduzida *OpenStudio* foi perfeitamente lida pelo programa.

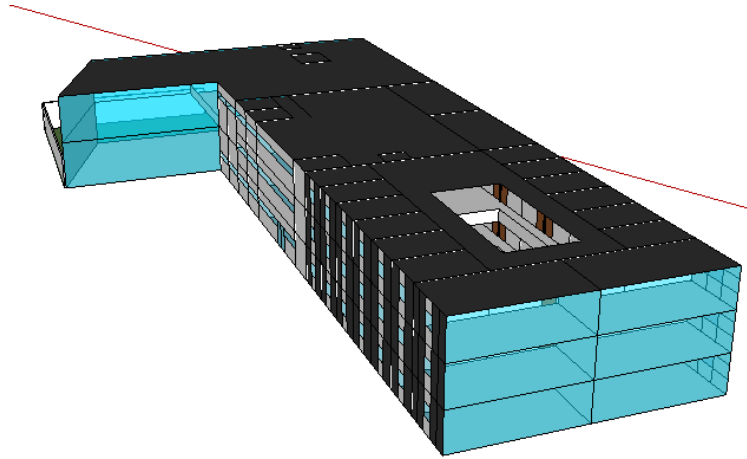


Figura 30: Modelo apresentado pela equipe do projeto arquitetônico

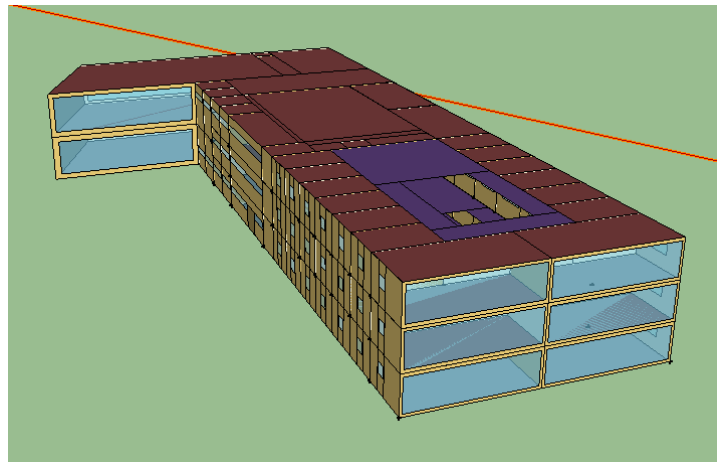


Figura 31: Modelo no OpenStudio

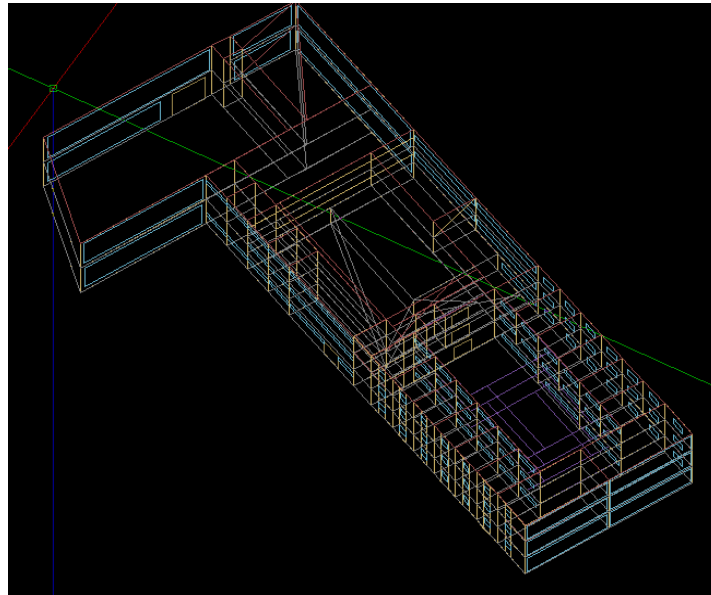


Figura 32: Modelo lido pelo EnergyPlus

5.4.3 Ventilação natural

A ventilação natural foi introduzida por meio do módulo *Air Flow Network* do *EnergyPlus*. Nessa etapa, foi considerado que as janelas permaneceriam abertas durante todas as horas do ano, inclusive durante a noite, com o objetivo de causar a acumulação térmica noturna e reduzir os picos de temperatura durante o dia por meio da inércia térmica da edificação.

Para levar em conta o efeito do vento, o cálculo dos coeficientes de pressão foi realizado pelo próprio *EnergyPlus*, utilizando-se o recurso *SurfaceAverageCalculation*. Esse recurso resolve a equação de Swani e Chandra ou a fórmula de Walker e Wilson, conforme o porte do edifício, para calcular os coeficientes de pressão em dois diferentes nós para cada ambiente. Considerou-se o edifício retangular para a utilização desses modelos, uma vez que o *EnergyPlus* somente está preparado para calcular esses coeficientes para edifícios retangulares. Essa simplificação não implica em alterações significativas dos resultados, uma vez que as entradas de ar são orientadas somente em duas direções, mantendo o requisito necessário para a aplicação da simplificação de edifício retangular para o uso do recurso *SurfaceAverageCalculation*.

A Figura 33, apresenta o esquema de modelagem da ventilação natural adotado pelo *EnergyPlus*.

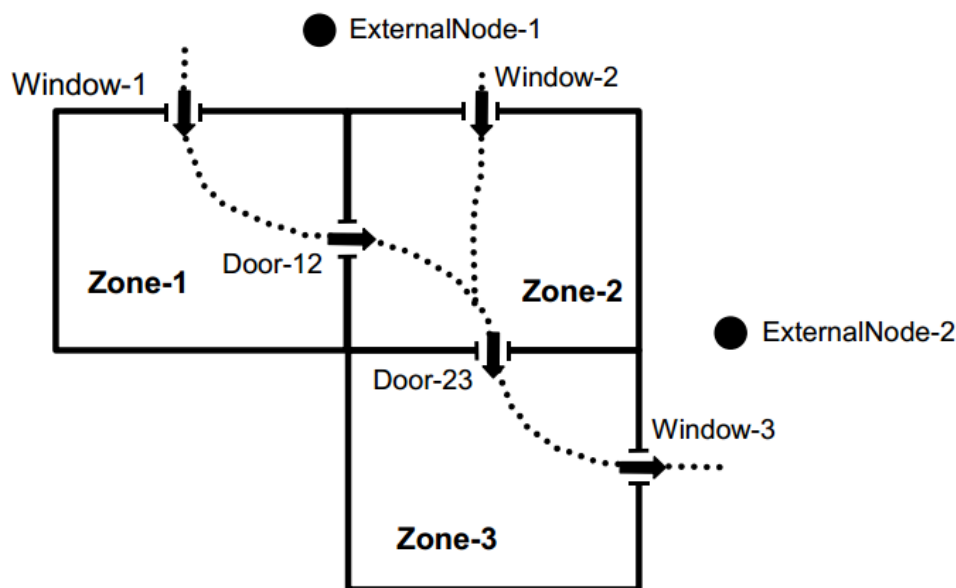


Figura 33: Esquema de modelagem da ventilação natural no *EnergyPlus* (US Department of Energy, 2013)

5.4.4 Chaminé Térmica

Na parede à noroeste disponibilizada pelo projeto arquitetônico, foi modelada a chaminé térmica. Esse dispositivo deverá atender aos laboratórios para estimular a ventilação natural sem permitir a entrada de mais radiação solar por outras janelas, o que resultaria no aquecimento do ambiente.

A modelagem da chaminé térmica foi introduzida diretamente no *EnergyPlus*, dado que o *OpenStudio*, ainda não dá suporte para esse tipo de solução.

O módulo do *EnergyPlus* utilizado para a modelagem da chaminé foi o *Zone Airflow*, por meio da subrotina de cálculo *ZoneThermalChimney*.

Na modelagem desse mecanismo, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- O coeficiente de descarga foi estimado em 0,5, conforme o comumente adotado nos trabalhos avaliados na revisão bibliográfica.
- A espessura do canal da chaminé foi de 0,30 m, pois foi a espessura ótima encontrada por Neves (2012) para a utilização do mecanismo em Brasília. Além disso, não é recomendado ultrapassar o limite máximo de 0,4 m para evitar a ocorrência de fluxo reverso.

Com o objetivo de aumentar a captação de radiação solar, foi criada uma extensão inclinada da chaminé. O ângulo de inclinação em relação à horizontal foi definido em 20° conforme as recomendações apresentadas em Neves (2012), com o objetivo de balancear a máxima captação de radiação sem prejudicar o escoamento do fluxo de ar.

A Figura 34 mostra a modelagem da envoltória da chaminé no *OpenStudio*, que posteriormente seria exportada para a inserção dos parâmetros diretamente no *EnergyPlus*. Importante salientar que a sustentação da extensão inclinada da chaminé não deverá ser em balaço como apresenta a figura. O modelo apresentado tem por função caracterizar os parâmetros térmicos do mecanismo, podendo o mesmo ser sustentado da maneira que o projeto civil considerar mais conveniente desde que não altere a forma geométrica do dispositivo.

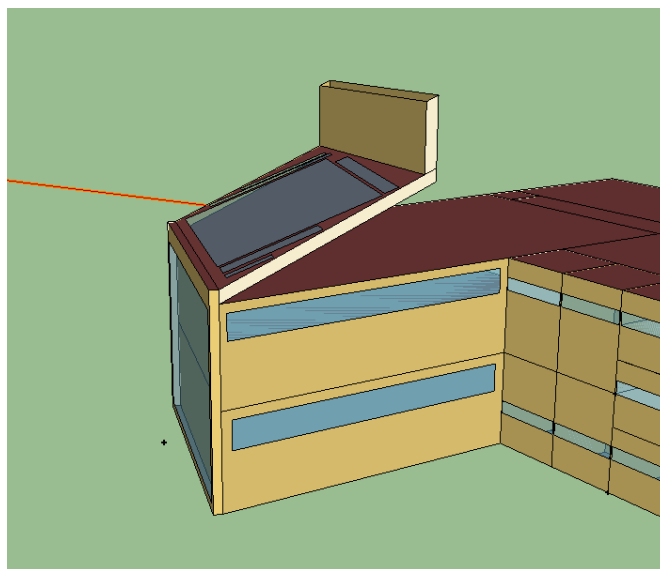


Figura 34: Modelagem da envoltória da chaminé térmica

5.4.5 Características construtivas

As características construtivas ainda não faziam parte do escopo do projeto arquitetônico apresentado. Diante disso, utilizaram-se padrões comuns no modelo inicial, que posteriormente foram aperfeiçoados para atender às mínimas condições de consumo de energia.

5.4.5.1 Paredes

As paredes, tanto exteriores quanto interiores, de tijolo furado de 20 cm de espessura com reboco pelos dois lados e revestimento externo de baixa absorção solar. O valor do coeficiente global de transferência de calor (U) resulta em $3,41 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

As resistências térmicas de convecção superficiais interiores e exteriores são calculadas pelo próprio *EnergyPlus*. Os valores do coeficiente global de transferência de calor (U) serão apresentados já considerando essa resistência, visto que essa é a maneira comum de apresentação, permitindo a comparação com os valores de U de outras construções.

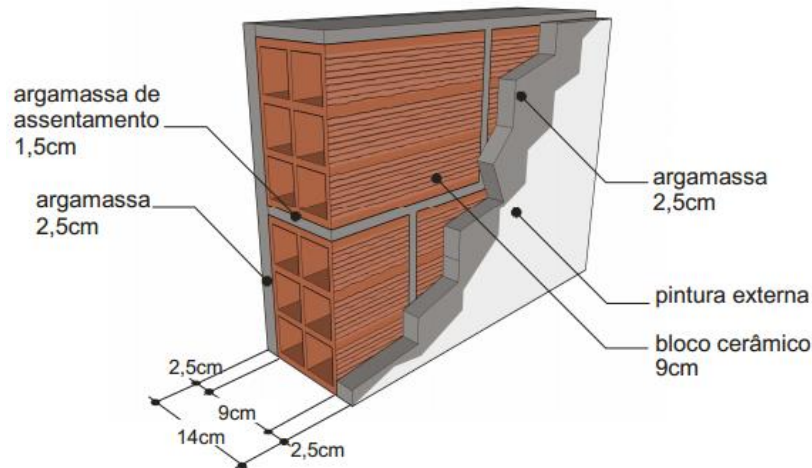


Figura 35: Parede básica utilizada inicialmente

Tabela 10: Propriedades dos materiais constituintes da parede

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Tijolo Furado	0,09	0,90	1600,0	920,0	0,7
Reboco Externo	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
<i>Exterior</i>					

5.4.5.2 Janelas

Os envidraçados foram trocados para laminados verde classe E, com sombreamento e boa vedação, de acordo com o envidraçado número 16 do Anexo V da Portaria Inmetro N°50/2013.

Tabela 11: Propriedades dos envidraçados

Material	Coefficiente de Transferência de Calor U [W/m².K]	Fator Solar []	Transmitância Visível []
Vidro Simples	7,0	0,914	0,899

5.4.5.3 Coberturas

A cobertura em laje de concreto e cerâmica, que revestirá o terraço para a utilização dos painéis fotovoltaicos. O valor do U para essa composição resultou em 2,57 W/m² . K.

Tabela 12: Propriedades dos materiais da cobertura

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Gesso	0,012	0,16	784,9	830,0	0,92
Concreto	0,10	1,75	2400,0	1000,0	0,6
Cerâmica de Pedra	0,025	1,80	2560,0	790,0	0,5
<i>Exterior</i>					

5.4.5.4 Pisos

Os pisos em laje de concreto e cerâmica.

Tabela 13: Propriedades dos materiais dos pisos

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Laje de Concreto	0,10	0,90	1600,0	920,0	0,7
Cerâmica de Pedra	0,025	1,80	2560,0	790,0	0,5
<i>Exterior</i>					

5.4.5.5 Chaminé térmica

A chaminé térmica foi concebida com vidro de alto fator solar. A parede de alta absorção térmica com isolamento térmico de alta performance no seu interior.

Tabela 14: Propriedades dos materiais constituinte da chaminé térmica

Parede de Absorção					
Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Isolante Térmico – Lã de Rocha	0,250	0,045	50,0	750,0	0,7
Parede de Concreto com argila expandida, com pintura preta de alta absorção	0,02	1,05	1600,0	1000,0	0,98
<i>Exterior</i>					

Vidro			
Material	Coefficiente de Transferência de Calor U [W/m².K]	Fator Solar []	Transmitância Visível []
Vidro de alto Fator Solar	4,0	0,98	0,899

5.4.6 Tipos de espaços e cargas internas

Os ambientes do edifício foram separados por tipos de espaços conforme as suas semelhanças em tipo de utilização, níveis e cronogramas de ocupação, iluminação e equipamentos.

Dessa maneira, os ambientes foram agrupados em 6 tipos de espaços:

- 1) Auditório
- 2) Salas de Empresas e Escritórios
- 3) Salas Multiuso
- 4) Áreas de Circulação

- 5) Salas da Administração
- 6) Laboratórios e Sanitários

As taxas de ocupação para cada tipo de ambiente foram estimadas conforme (ABNT, 2008).

Os níveis de iluminância foram especificados conforme as normas vigentes que especificam a iluminação de ambientes de trabalho (ABNT, 2013). As lâmpadas adotadas para todo o edifício foram de LED, do fabricante Cree com as seguintes especificações:

- Próprias para instalação em escritório e auditórios
- Modelo UR3-24
- 20% de dissipação de calor
- Capacidade de dimerização
- Eficiência de 102 Lúmens/Watt

Os equipamentos foram estimados inicialmente conforme o especificado pela ABNT (ABNT, 2008).

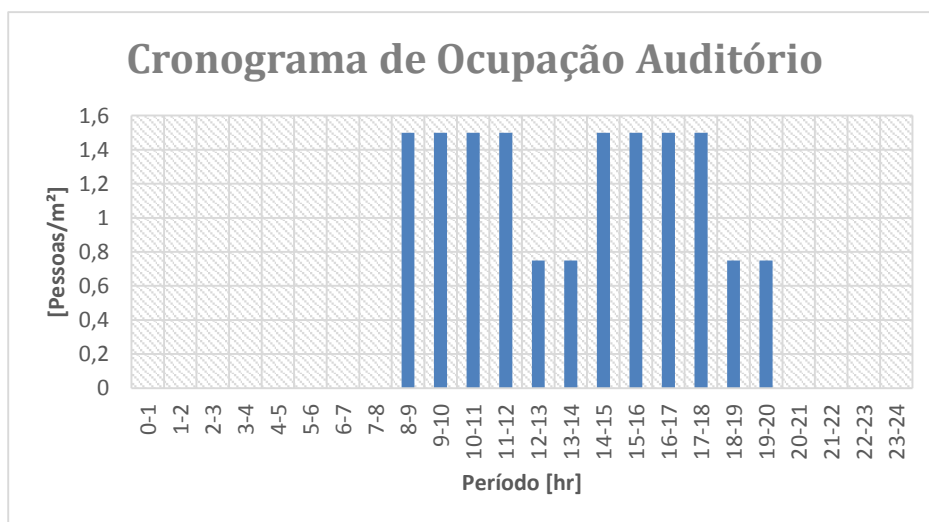
As taxas de renovação de ar foram determinadas conforme a NBR 16401 e a ASHRAE Handbook-Fundamentals por meio dos fatores de área e pessoa. A eficiência de ventilação foi considerada numericamente igual a 1 para todos os ambientes.

As cargas por infiltrações serão consideradas desprezíveis, pois o sistema de ventilação mecânica deverá manter os ambientes pressurizados por meio do ar de renovação. Além da pressurização, as janelas deverão ser bem vedadas de modo a contribuir para a redução das infiltrações.

Nos itens seguintes são apresentados as especificidades para cada tipo de espaço.

5.4.6.1 Auditório

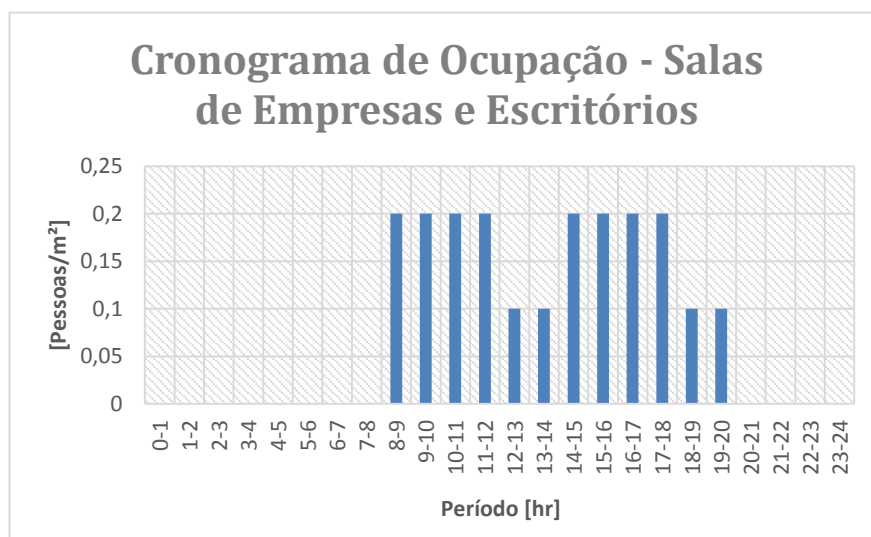
- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:



- Dissipação de calor por pessoa: 95 W/pessoa
- Iluminação
 - Iluminância: 500 lux
 - Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{500 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 4,90 \text{ W/m}^2$
 - Fração de liberação de calor: 20%
 - Cronograma de iluminação igual ao de ocupação
- Equipamentos:
 - 10 Computadores portáteis
 - Potência elétrica: 20 W cada (média adotada pelo Procel).
 - Fração de liberação de calor: 20%
 - 1 Projetor
 - Potência elétrica: 150 W
 - Fração de liberação de calor: 20%
- Taxas de renovação de ar: 2,5 L/s.pessoa e 0,3 L/s.m²

5.4.6.2 Salas de Empresas e Escritórios

- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:

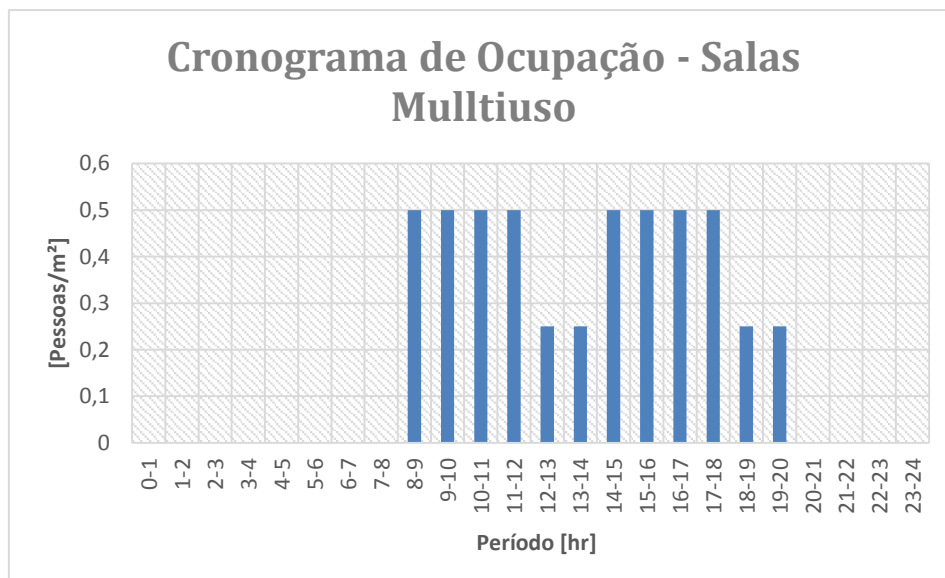


- Dissipação de calor por pessoa: 115W/pessoa
- Iluminação
 - Iluminância: 500 lux

- Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{500 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 4,90 \text{ W/m}^2$
 - Fração de liberação de calor: 20%
- Cronograma de iluminação igual ao de ocupação
- Equipamentos:
 - Taxa de consumo elétrico: 20 W/computador por pessoa (média adotada pelo Procel).;
 - Fração de liberação de calor: 20%
- Taxas de renovação de ar:
 - 2,5 L/s.pessoa e 0,3 L/s.m²

5.4.6.3 Salas Multiuso

- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:

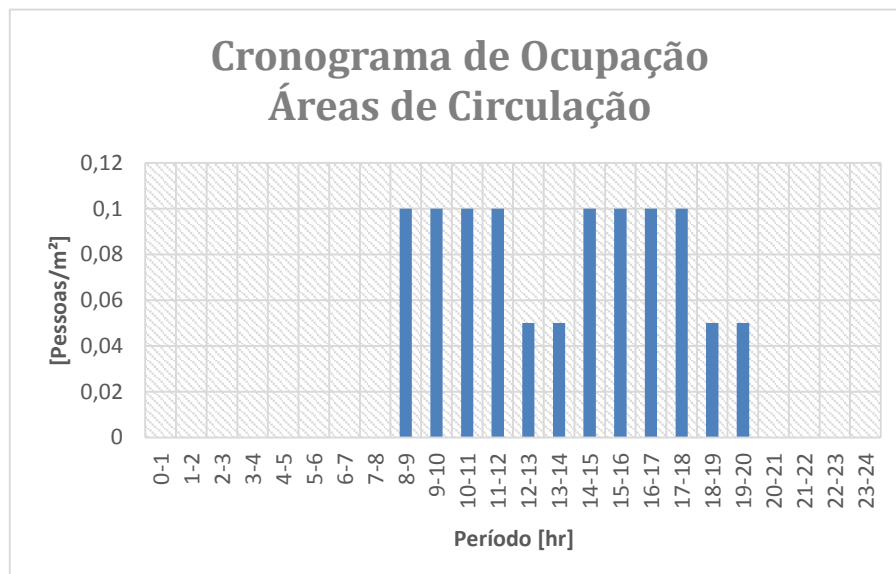


- Dissipação de calor por pessoa: 115W/pessoa
- Iluminância: 500 lux
- Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Estimativa: 1 Lux = 1 Lúmen/m²
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{500 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 4,90 \text{ W/m}^2$

- Equipamentos:
 - Taxa de consumo elétrico: 20 W/computador por pessoa (média adotada pelo Procel).;
 - Fração de liberação de calor: 20%
- Taxas de renovação de ar:
 - 2,5 L/s.pessoa e 0,3 L/s.m²

5.4.6.4 Área de Circulação

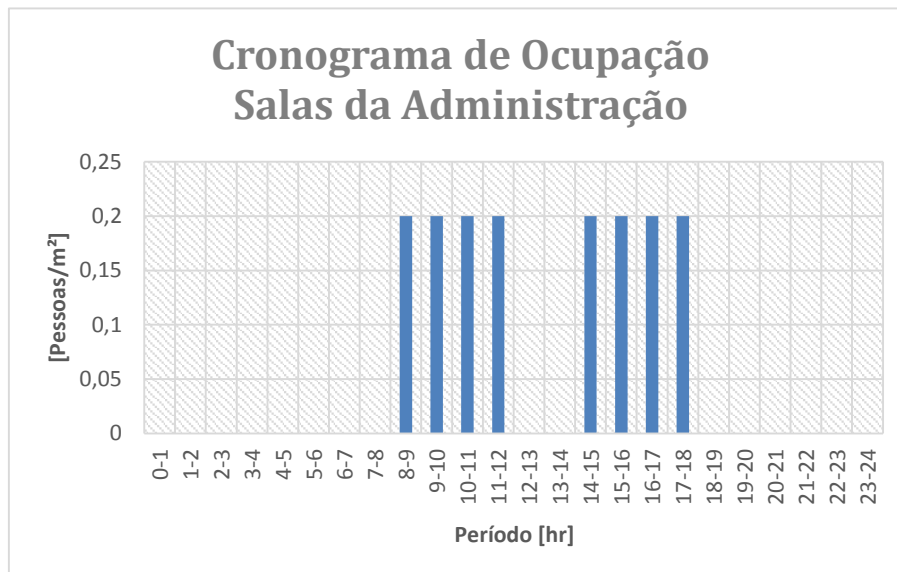
- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:



- Dissipação de calor por pessoa: 160W/pessoa
- Iluminância: 100 lux
- Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Estimativa: 1 Lux = 1 Lúmen/m²
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{100 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 0,98 \text{ W/m}^2$
- Equipamentos: Não foram considerados equipamentos na área de circulação.
- Taxas de renovação de ar:
 - 2,5 L/s.pessoa e 0,3 L/s.m²

5.4.6.5 Salas da administração

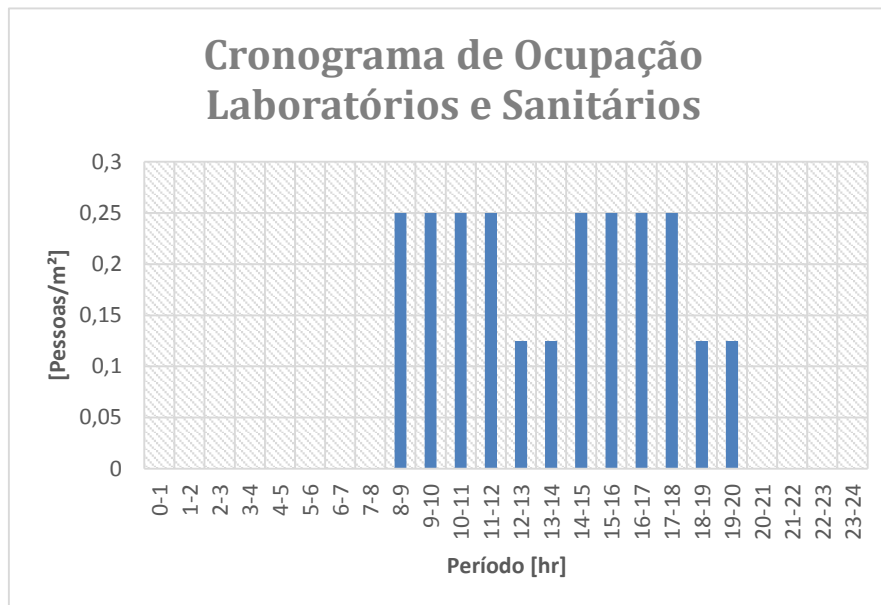
- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:



- Dissipação de calor por pessoa: 140W/pessoa
- Iluminância: 500 lux
- Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Estimativa: 1 Lux = 1 Lúmen/m²
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{500 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 4,90 \text{ W/m}^2$
- Equipamentos:
 - Taxa de consumo elétrico: 20 W/computador por pessoa (média adotada pelo Procel).;
 - Fração de liberação de calor: 20%
- Taxas de renovação de ar:
 - 2,5 L/s.pessoa e 0,3 L/s.m²

5.4.6.6 Laboratórios e Sanitários

- Taxa e cronograma de ocupação: de segunda a sexta-feira na distribuição horária abaixo:



- Dissipação de calor por pessoa: 140W/pessoa
- Iluminância: 100 lux
- Taxa de iluminação:
 - Lâmpada LED CREE
 - Eficiência: 102 Lúmens/Watt
 - Estimativa: 1 Lux = 1 Lúmen/m²
 - Taxa de iluminação = $\frac{\text{Lúx necess}}{\text{LPW}} = \frac{100 \frac{\text{Lúm}}{\text{m}^2}}{102 \frac{\text{Lúm}}{\text{W}}} = 0,98 \text{ W/m}^2$
- Equipamentos:
 - Consumo elétrico: 35 W/m²
 - Fração de liberação de calor: 20%
 - Funcionamento a plena carga durante 4 horas dos dias úteis e em carga parcial (50%) durante outras 4 horas dos dias úteis
- Taxas de renovação de ar:
 - Sanitários: Exaustão mecânica 35 L/s.m².bacia
 - Laboratórios: 5 L/s.pessoa e 0,9 L/s.m²

5.5 Simulação térmica em evolução livre

Por evolução livre entende-se a simulação do edifício sem a atuação de nenhum mecanismo ativo de climatização.

A simulação foi realizada com o objetivo de verificar se o edifício atende às condições de conforto térmico.

O intervalo de cálculo (*timestep*) da simulação foi definido para uma hora, permitindo um maior critério na análise dos resultados.

5.5.1 Conforto térmico

O conforto térmico foi avaliado por meio do Voto Predito Médio (PMV) e da Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD), propostos por Fanger, conforme especifica a norma ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Segundo traz a norma, para que as condições de conforto sejam aceitáveis, o índice PMV deve ser mantido entre -0,5 e 0,5 nas horas de ocupação do edifício. Dessa maneira, no máximo 10% (valor máximo aceitável para o PPD) dos ocupantes estariam insatisfeitos com as condições térmicas interiores.

Na presente análise, serão apresentados o perfil anual do índice PMV para cada um dos ambientes avaliados. Para o cômputo do PMV, foi definido que os valores de vestimenta e atividade das pessoas seriam de acordo com o local típico de análise. Predominantemente foram adotados valores de $Clo = 1$ e $MET = 1,1$. A velocidade do ar para o cômputo do PMV foi considerada constante e igual a 0,15 m/s.

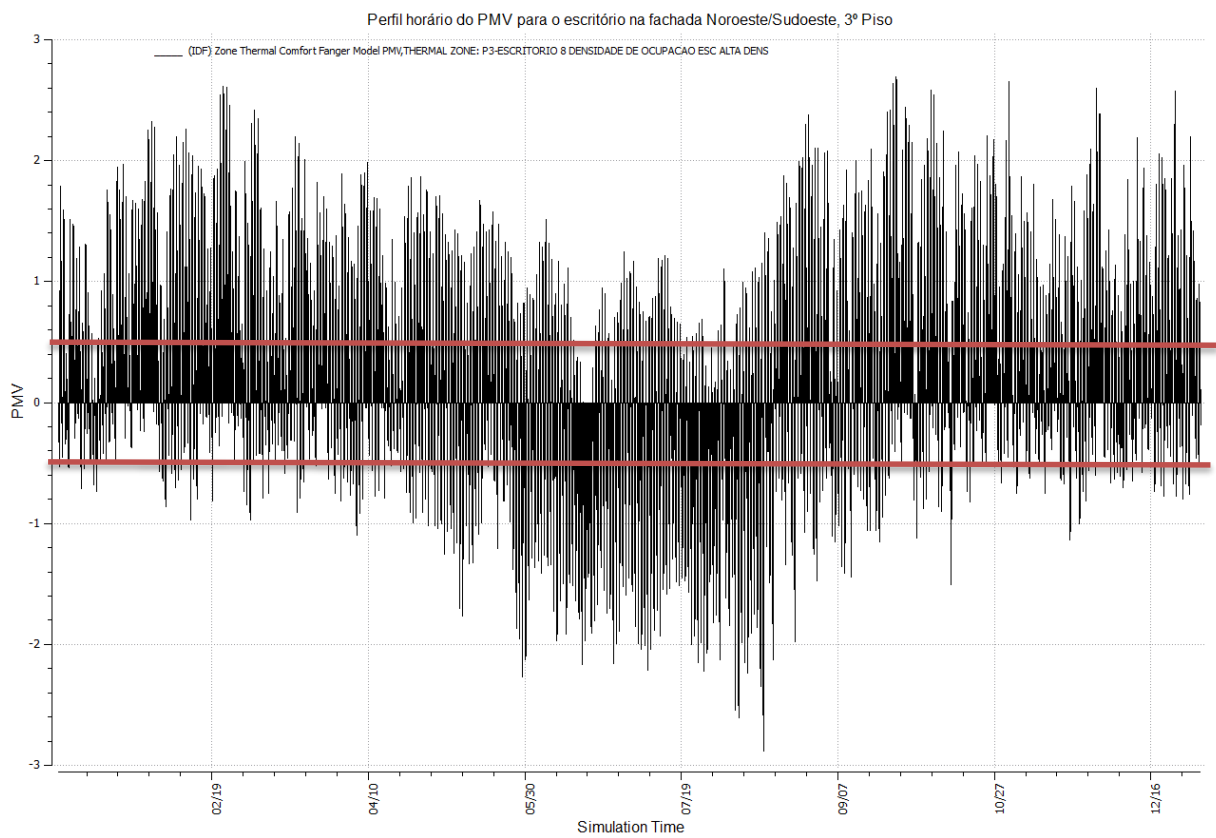
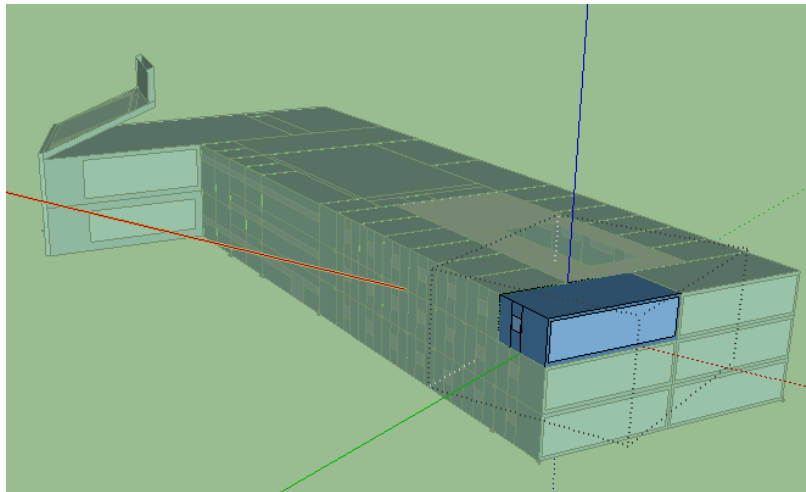
5.5.2 Resultados

Foram escolhidos oito ambientes de referência para a análise dos resultados adotando para a escolha aqueles que apresentaram condições críticas de desconforto térmico no verão.

Nos itens seguintes serão apresentadas a identificação, localização, perfil do PMV ao longo do ano e o número de horas de ocupação com desconforto por calor e por frio. Entende-se por horas de ocupação de desconforto por calor, o número de horas entre as 08:00 e as 20 horas em que o valor do PMV é maior que 0,5. O mesmo foi adotado para as horas de ocupação de desconforto por frio com PMV menor que 0,5.

As linhas horizontais em destaque nos gráficos mostram os limites de conforto por calor e por frio. Sempre que o gráfico ultrapassar essas linhas, as condições térmicas no ambiente analisado estariam desconfortáveis.

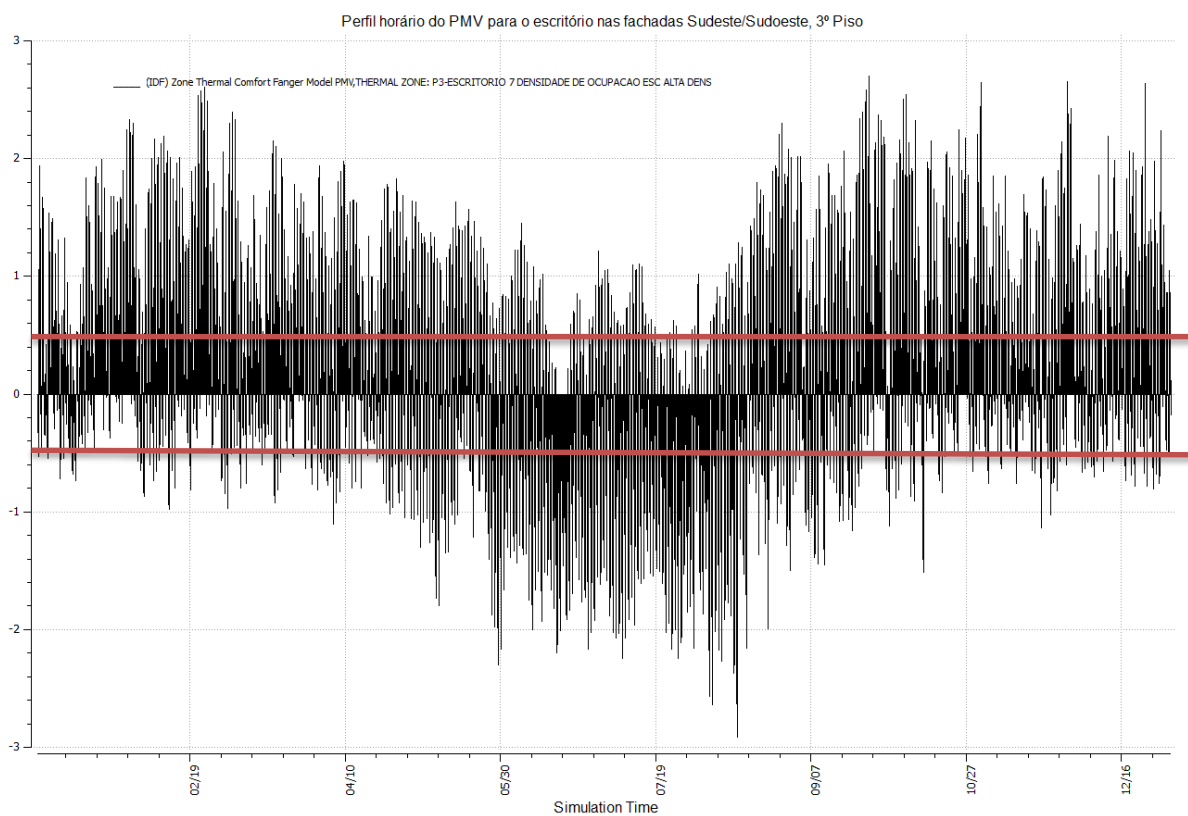
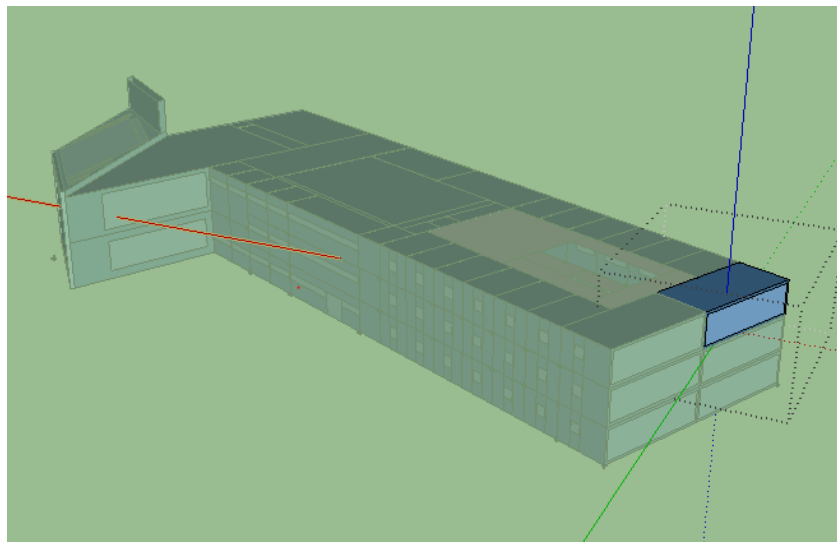
5.5.2.1 Escritório nas fachadas Noroeste/Sudoeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 2886 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 396 horas

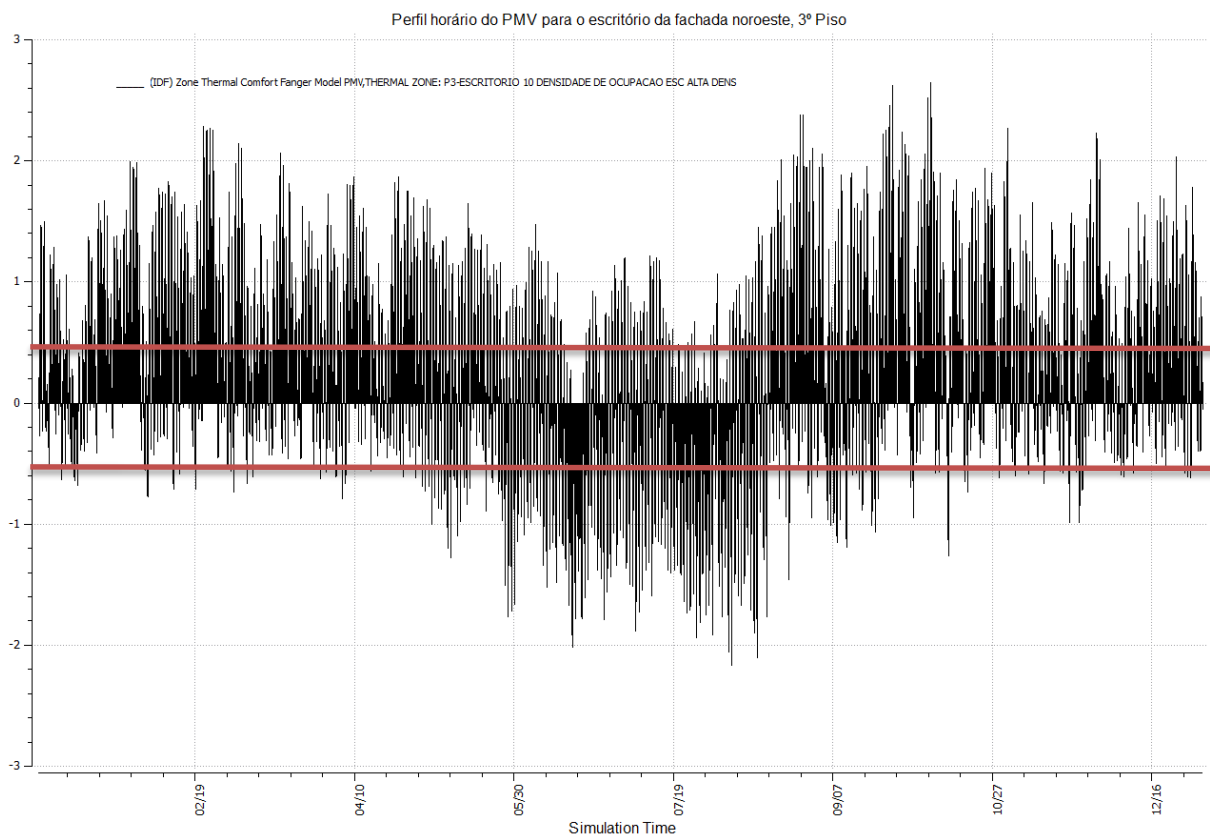
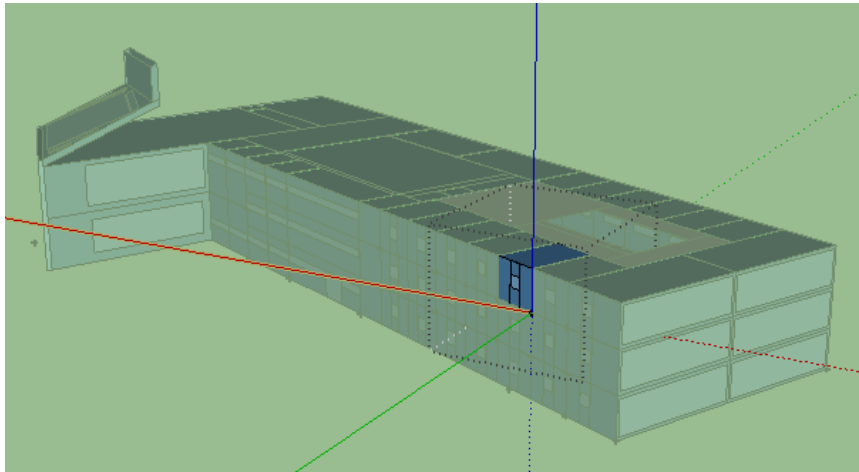
5.5.2.2 Escritório nas fachadas Sudeste/Sudoeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 2884 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 399 horas

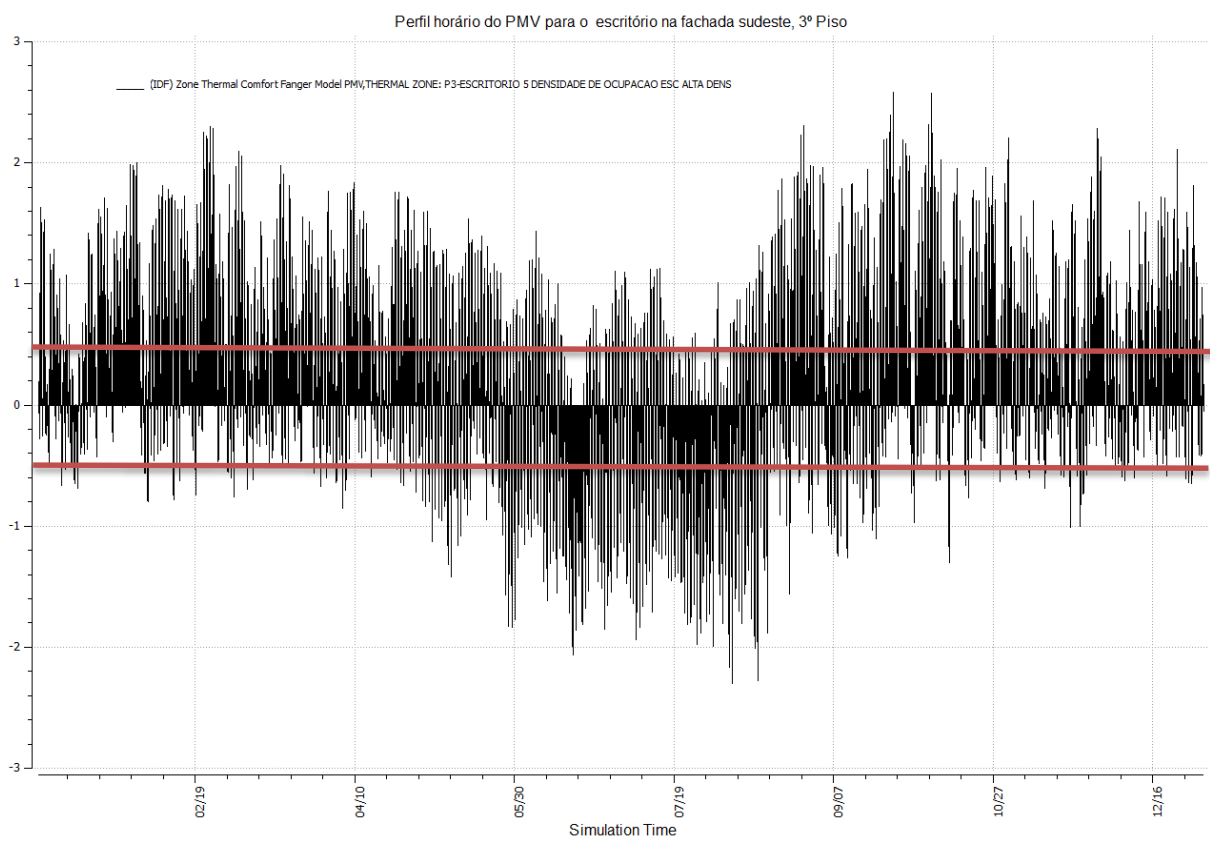
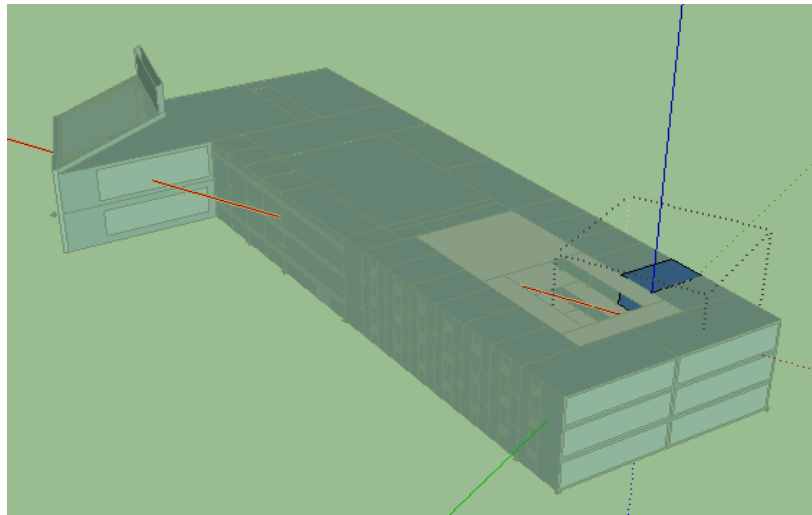
5.5.2.3 Escritório da fachada noroeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 2689 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 396 horas

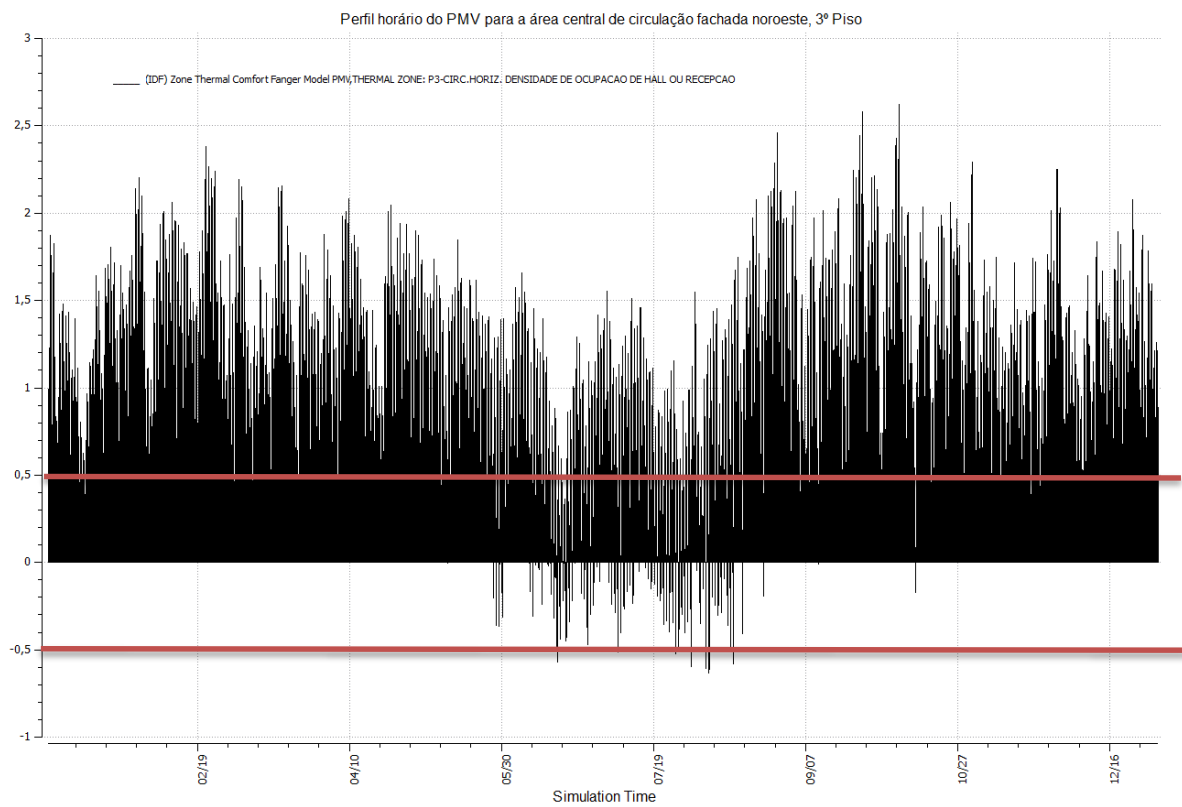
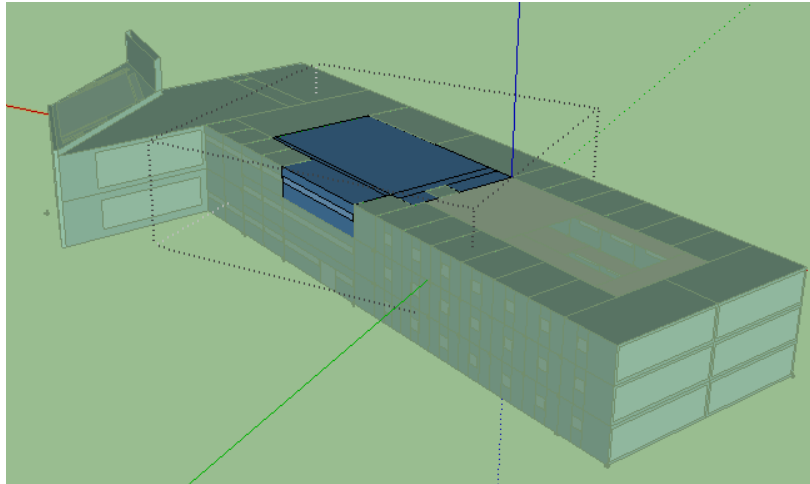
5.5.2.4 Escritório na fachada sudeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 2695 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 394 horas

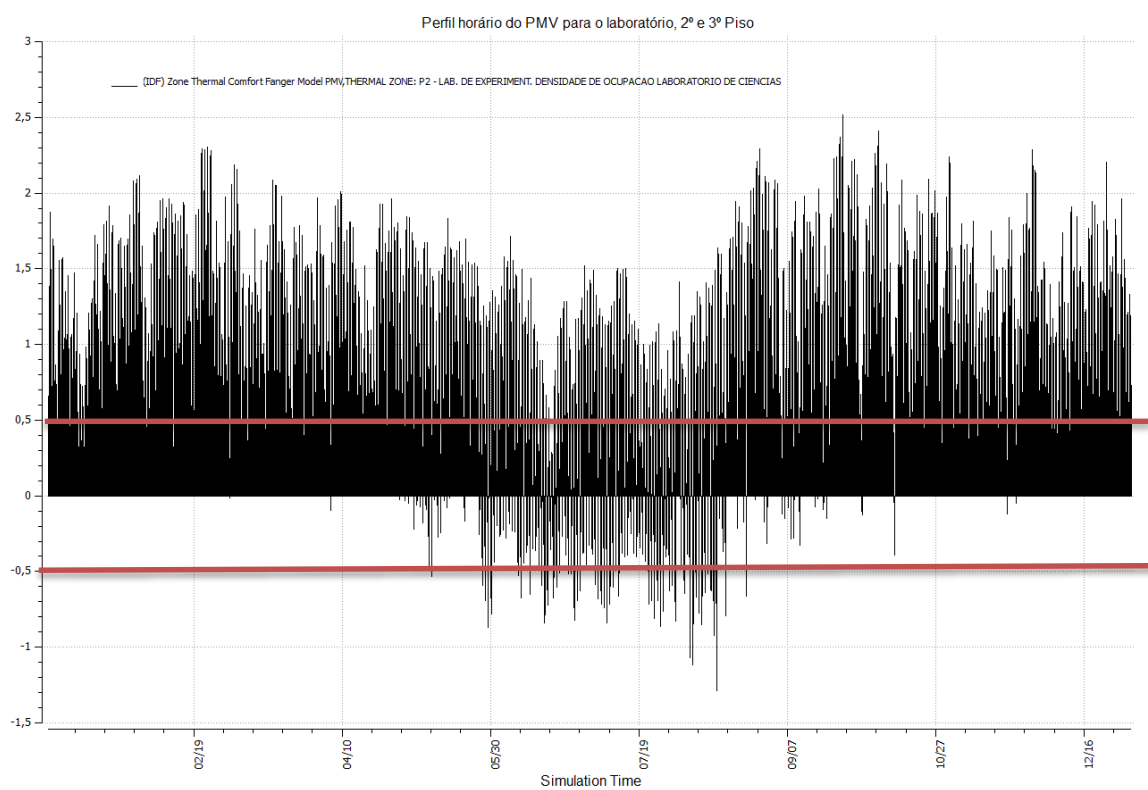
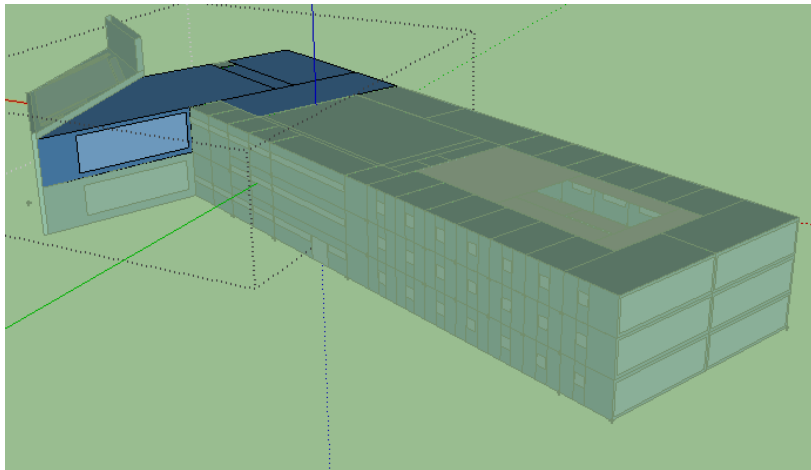
5.5.2.5 Área central de circulação na fachada noroeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 4156 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 6 horas

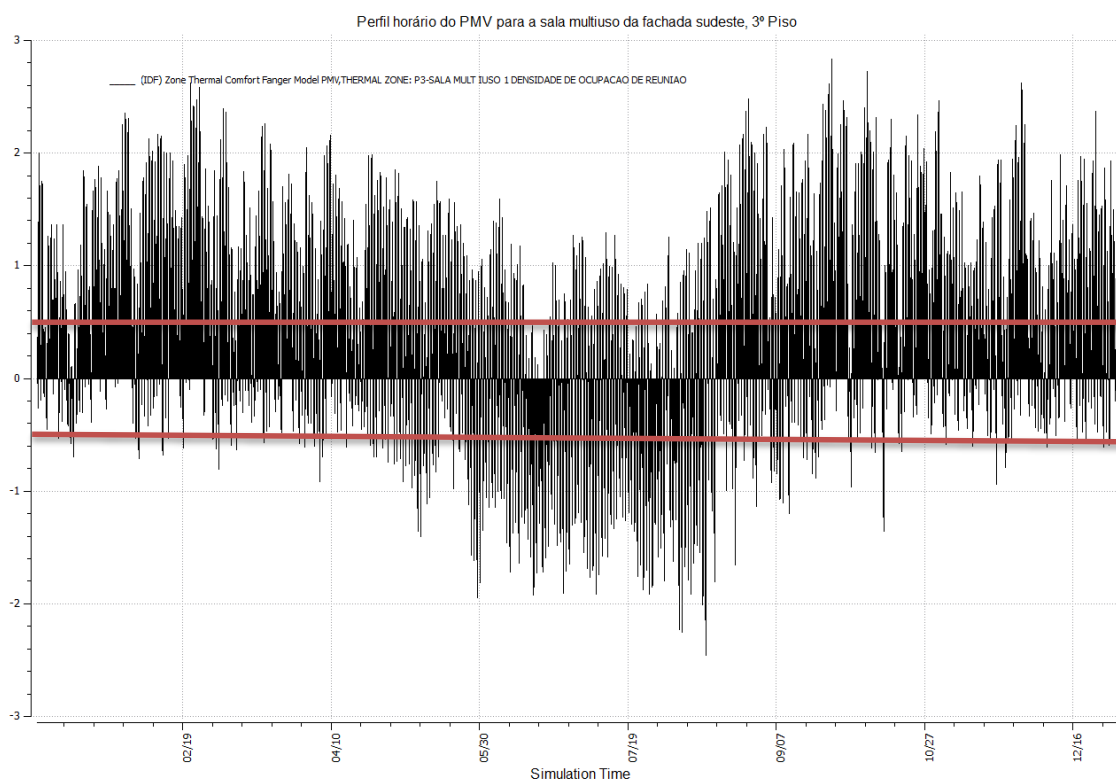
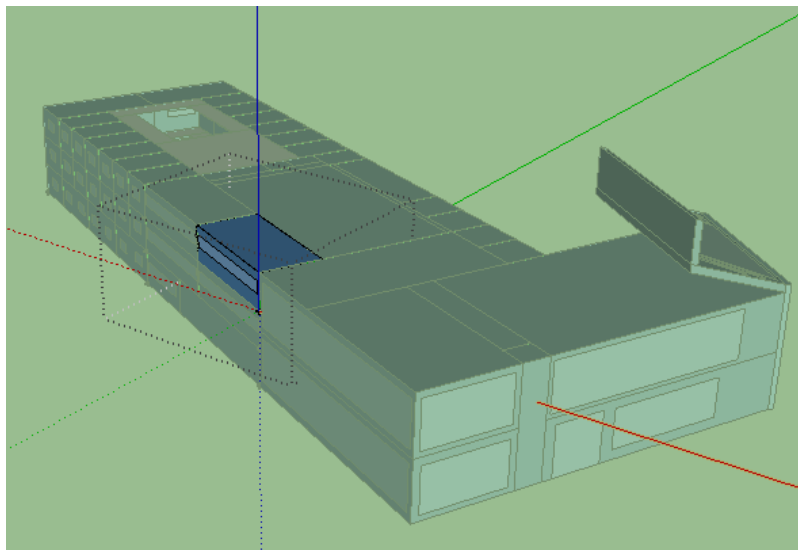
5.5.2.6 Laboratório, Piso Superior



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 4144 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 29 horas

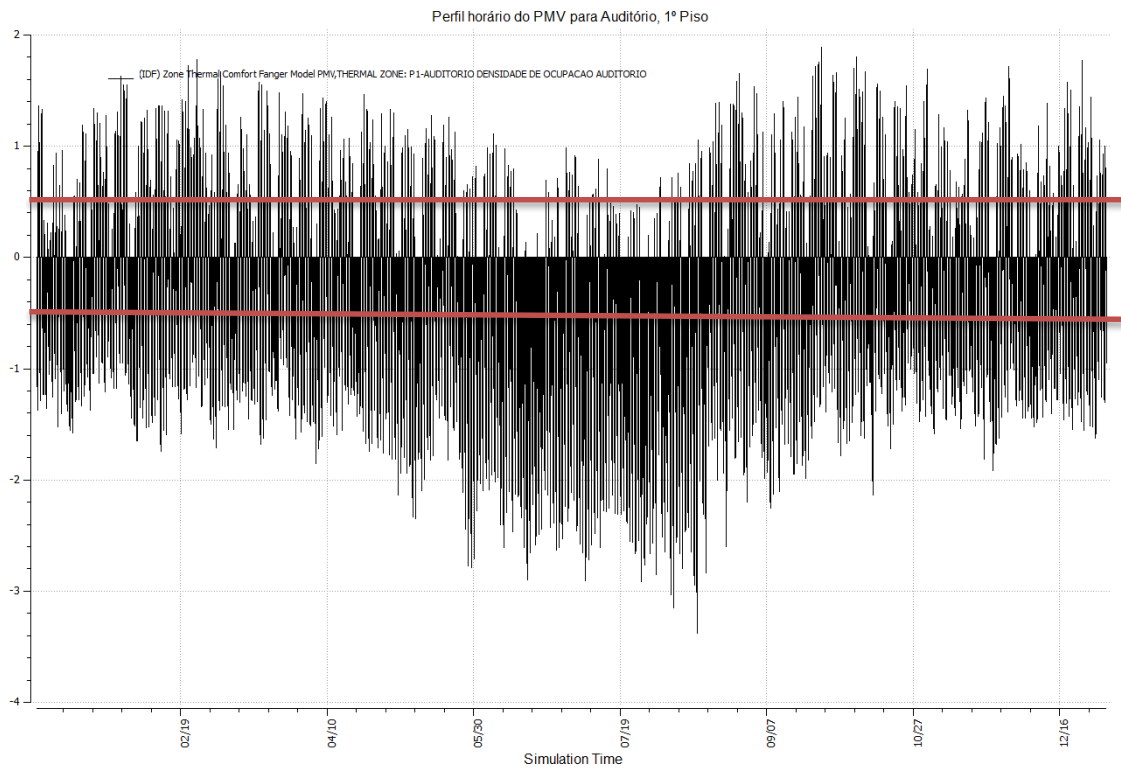
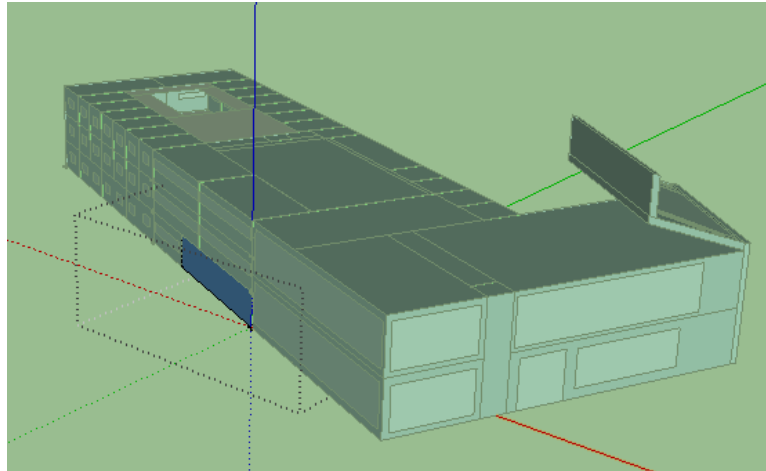
5.5.2.7 Sala multiuso da fachada sudeste, 3º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 3213 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 271 horas

5.5.2.8 Auditório, 1º Piso



Número de horas de ocupação de desconforto por calor: 1779 horas

Número de horas de ocupação de desconforto por frio: 1100 horas

5.5.3 Análise dos resultados

Em todos os casos mostrados verifica-se condições de desconforto térmico durante grande parte do ano. Predominantemente o desconforto é causado por calor, atingindo valores de PMV superiores a 2,5.

Fica evidenciado, portanto, a necessidade de um sistema de climatização ativo de resfriamento, visto que mais de 10% dos ocupantes estariam insatisfeitos em horas de ocupação durante todos os meses do ano.

No inverno, entre maio e setembro, verifica-se que o PMV tem valores menores do que no resto do ano, mantendo-se durante mais de um dia abaixo de zero em alguns ambientes e atingindo picos inferiores a -2,5 no mês de agosto.

O desconforto em virtude do frio ocorreria tipicamente no período noturno e no início das horas úteis nos meses de inverno, atingindo picos nas horas próximas do amanhecer. Com isso, mostra-se a necessidade de se regular a abertura das janelas no inverno, de maneira a não permitir que as condições de conforto sejam desfavoráveis nas primeiras horas úteis. Tal medida teria por objetivo restringir a ventilação noturna, conservando parte da energia armazenada dentro da edificação durante a noite para que, no dia seguinte pela manhã, a temperatura interna resulte em uma condição de conforto. Se com essa modulação for possível manter as condições de conforto pela manhã, não será necessário aquecer o edifício.

Observa-se que o “frio” mencionado acima não ocorreria nos ambientes de laboratório nem na área de circulação, visto que o PMV mantém-se quase sempre acima de zero. No entanto, nesses ambientes não se verifica picos superiores a 0,5 no PMV, ou seja, apesar de não existir a condição de frio durante as noites de inverno, também não ocorre condição de calor mais acentuada do que nos outros ambientes durante as tardes do verão. Essa redução da amplitude térmica anual é resultado da inércia térmica mais alta que esses ambientes apresentam. A maior inércia térmica desses ambientes em relação ao resto do edifício é consequência da grande quantidade de paredes interiores, o que resultou numa redução da amplitude do PMV ao longo do ano.

O auditório, ainda que sem janelas para permitir a ventilação natural e com o maior grau de cargas internas do edifício, apresentou um PMV sempre inferior a 2, sendo até mesmo negativo durante boa parte do tempo. Esse comportamento diferenciou-se muito da sala multiuso do 3º andar que tem perfil de cargas internas semelhante, que ocupa a mesma posição de fachada, mas que apresentou condições de desconforto superiores às do auditório em virtude do calor. Dessa comparação, pode-se concluir que a entrada de calor pela cobertura e pelas janelas do edifício é determinante.

Da presente análise, presume-se que as seguintes modificações teriam efeito benéfico no conforto térmico do edifício:

- Restrição da ventilação noturna durante o inverno nos ambientes de escritório para evitar a queda da temperatura a níveis desconfortáveis no inverno;

- Aumento da inércia térmica do edifício por meio da alteração dos materiais construtivos;
- Restrição da condução de calor pela cobertura com o uso de sombreamentos e isolamentos térmicos;
- Restrição da radiação solar pelos envidraçados por meio da troca dos vidros e de sombreamentos.

Essas modificações serão realizadas na otimização térmica do edifício apresentada na seção 5.8, que avaliará a carga térmica do prédio para diversos cenários da construção.

5.6 Simulação de carga térmica

A simulação de carga térmica foi realizada utilizando o recurso *Ideal Air Loads* que também permite estimar qual o consumo de energia térmica para climatizar o edifício.

A ventilação natural e a chaminé térmica passaram a ser desconsideradas nessa análise em virtude da impossibilidade de integrar a ventilação natural com a renovação de ar contabilizada pelo recurso *Ideal Ai Loads*.

O PMV será apresentado agora somente para um dia de projeto, considerado o dia crítico de verão. Essa alteração é necessária porque é normal ocorrer picos anuais de PMV fora das faixas de conforto durante os fins de semana, feriados e horas não ocupadas do edifício. Com um perfil anual, não seria possível diferenciar esses picos dos possíveis valores de PMV fora da faixa de conforto ($0,5 < PMV < 0,5$) dentro dos períodos de ocupação. Diante de tal impasse, optou-se por analisar apenas o dia crítico de verão de Brasília, definido pelo *Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook* como 21 de outubro com uma abrangência de 98% das condições climáticas, e verificar se as condições interiores dos ambientes climatizados atendem aos requisitos de conforto.

5.6.1 Definição do limite de temperatura

O limite de temperatura máxima interna para as horas de ocupação é fator determinante no cálculo da carga térmica e no conforto dos ocupantes. Um valor de temperatura que normalmente resulta em um PMV máximo de 0,5, é 23 °C. Esse valor é comumente adotado no cálculo da carga térmica e regulação dos sistemas de climatização em edifícios comerciais e será o valor inicial regulado para os termostatos dessa simulação.

Será mostrado na próxima seção que alguns ambientes não apresentaram condições de conforto com uma temperatura de bulbo seco de 23,5°C. No entanto, essa temperatura máxima controlada não será alterada nessa fase das simulações porque, ao realizar a otimização do edifício no item 5.7, fatores que influenciam a temperatura radiante serão alteados, o que resultará em melhores condições de conforto interiores. Se, mesmo com as otimizações, não se alcançar um limite máximo de $PMV = 0,5$, os termostatos da temperatura interna para cada local serão ajustados. Essa decisão de projeto foi tomada

porque diminuir, ainda que em 1°C, a temperatura dos ambientes climatizados, resulta em um aumento considerável no consumo de energia. Portanto, essa deverá ser a última alternativa.

Nos fins de semana, o limite superior da temperatura interna foi estabelecido em 30°C com o objetivo de não permitir picos elevados que poderiam resultar em uma dificuldade para o sistema climatizar os ambientes na segunda-feira seguinte, em decorrência da acumulação térmica do edifício.

Não foram ligados os termostatos dos sanitários, escadas e elevadores pois desde a fase inicial de projeto não se pretende climatizá-los visando a economia de energia. Essa decisão foi tomada porque os ocupantes não permanecem parte considerável do tempo nesse ambientes.

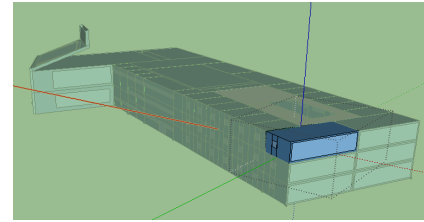
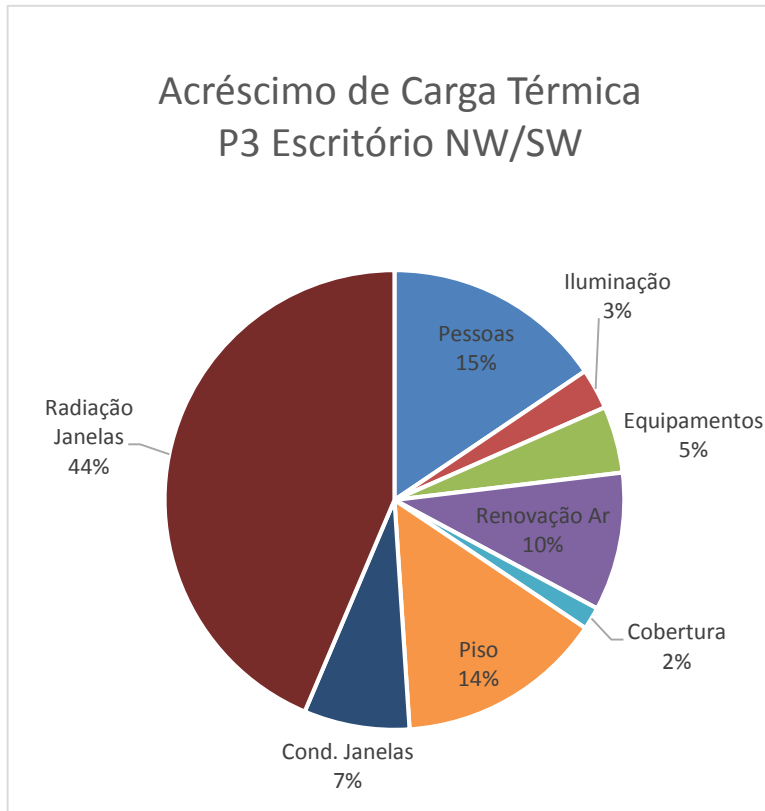
5.6.2 Resultados

O resultado do modelo simulado mostrou um pico de carga térmica de 297,31 kW às 14 horas e 30 minutos do dia 24 de fevereiro. O consumo anual de energia térmica foi calculado em 1.428,74 GJ.

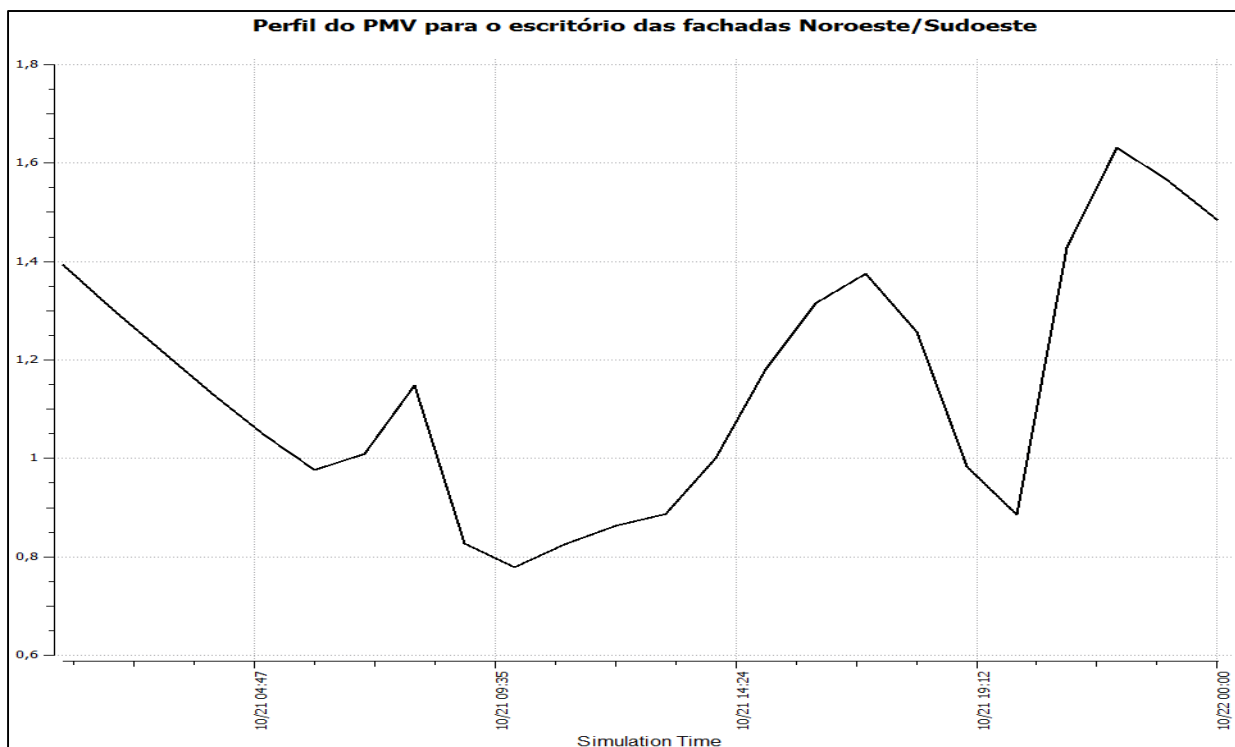
Com o objetivo de permitir uma análise de quais fatores penalizaram mais a carga térmica, foram analisados os seguintes resultados para os mesmos ambientes apresentados no ítem 5.5.2:

- 1) Carga térmica, em W;
- 2) Consumo anual de energia térmica, em GJ;
- 3) Perfil horário do PMV para o dia crítico de projeto;

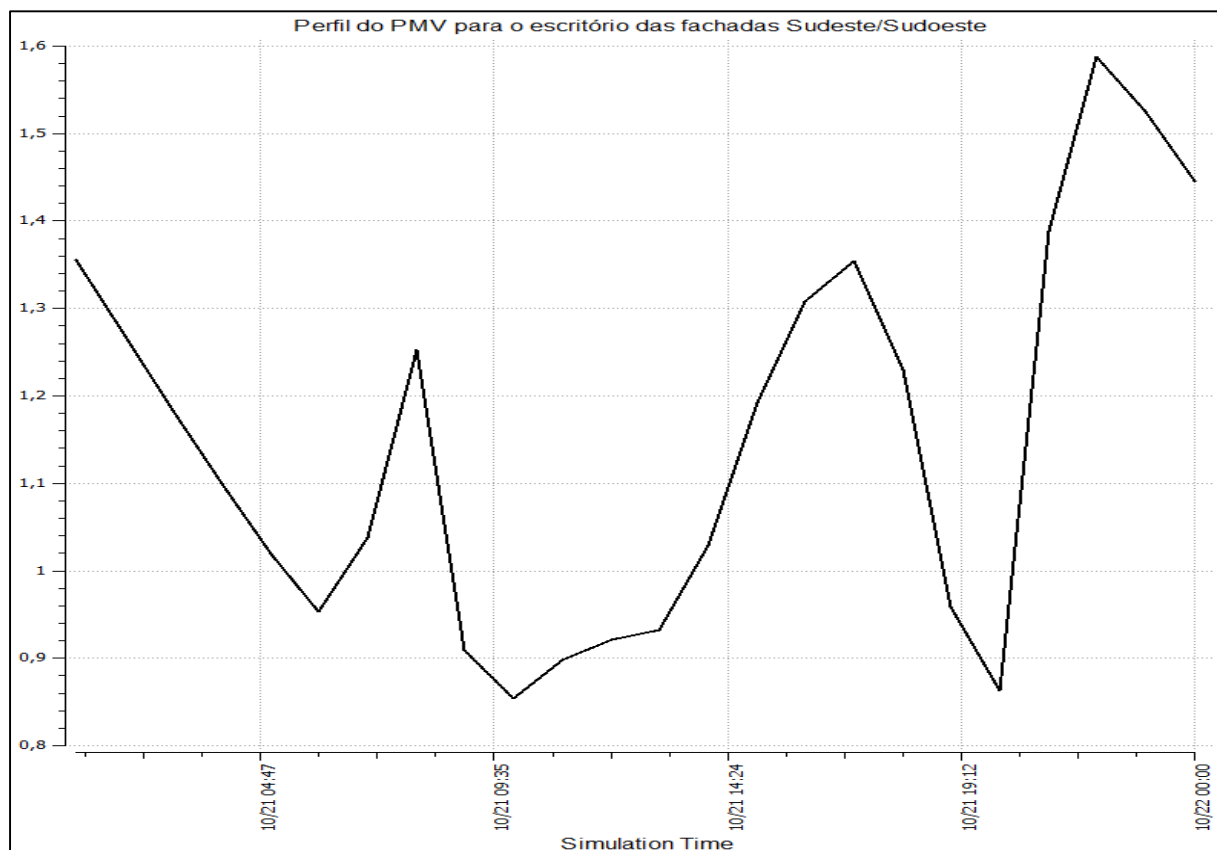
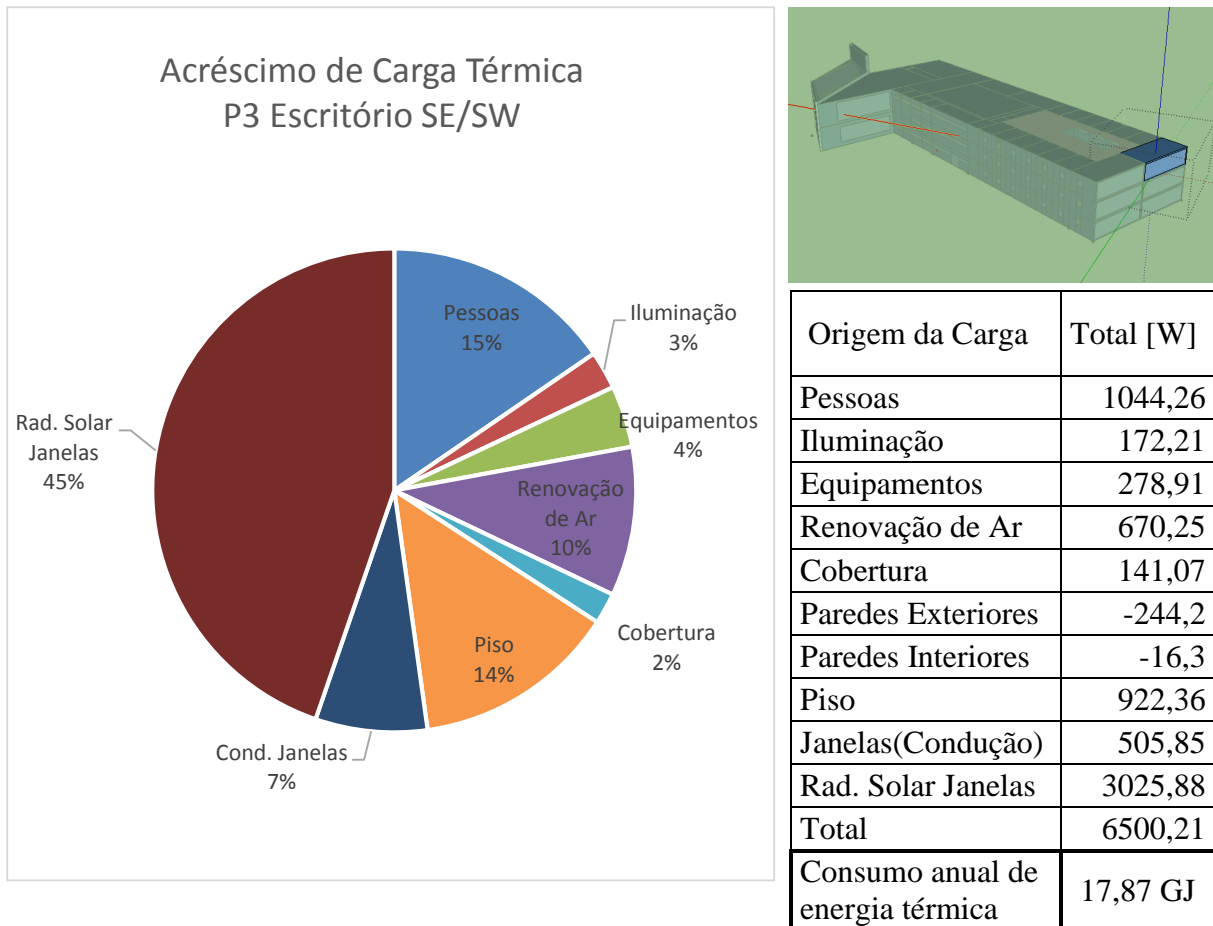
5.6.2.1 Escritório nas fachadas Noroeste/Sudoeste, 3º Piso



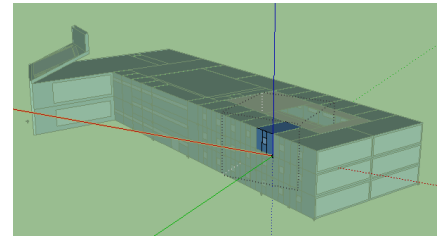
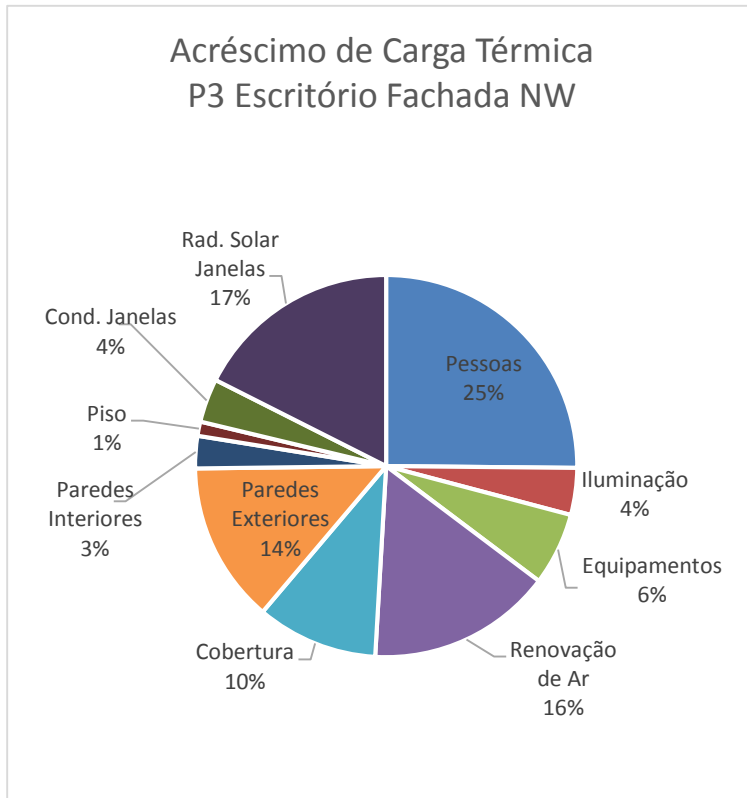
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	1077,49
Iluminação	198,27
Equipamentos	325,51
Renovação de Ar	674,93
Cobertura	109,77
Paredes Exteriores	-272,7
Paredes Interiores	-10,3
Piso	1008,68
Janelas(Condução)	515,25
Rad. Solar Janelas	3024,69
Total	6651,60
Consumo anual de energia térmica	17,60 GJ



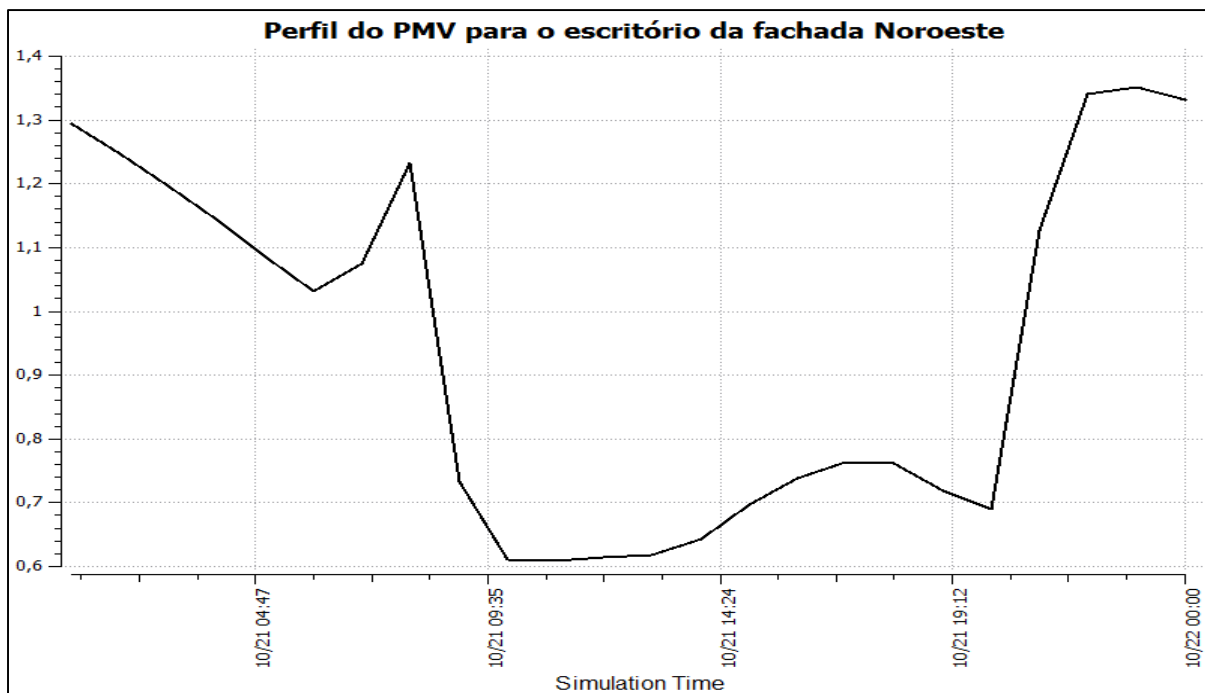
5.6.2.2 Escritório nas fachadas Sudeste/Sudoeste, 3º Piso



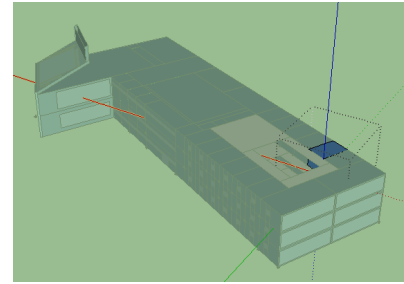
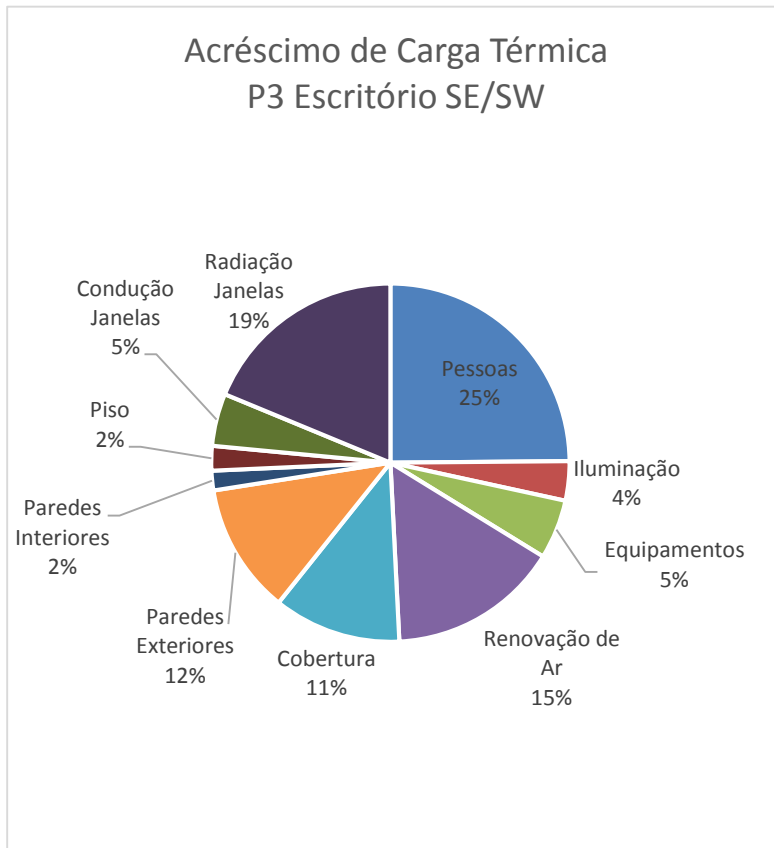
5.6.2.3 Escritório da fachada noroeste, 3º Piso



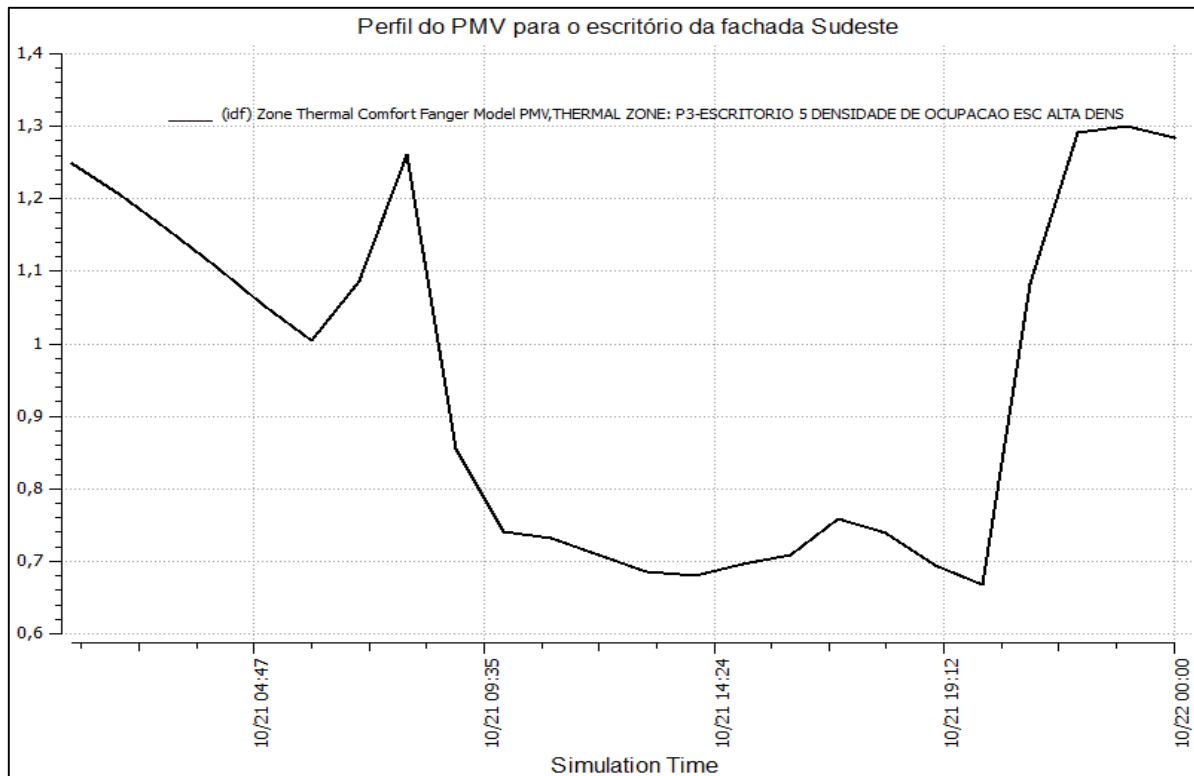
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	1077,49
Iluminação	198,27
Equipamentos	325,51
Renovação de Ar	674,93
Cobertura	109,77
Paredes Exteriores	-272,7
Paredes Interiores	-10,3
Piso	1008,68
Janelas(Condução)	515,25
Rad. Solar Janelas	3024,69
Total	6651,60
Consumo anual de energia térmica	3,62 GJ



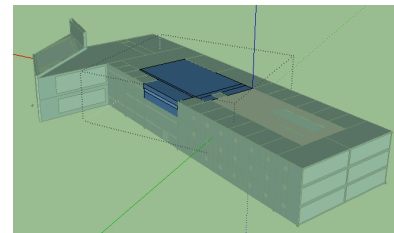
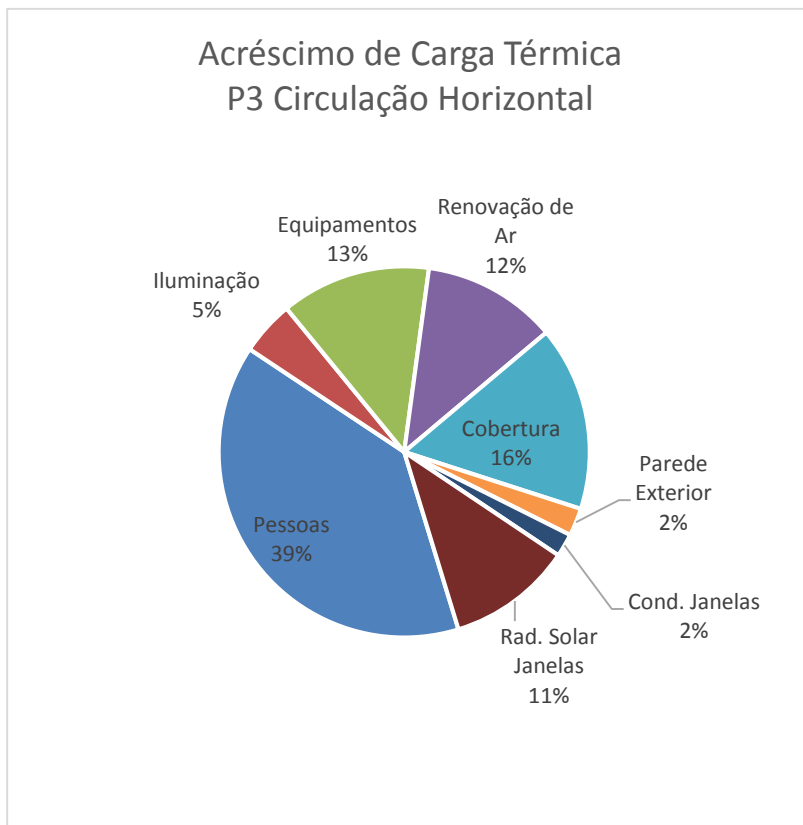
5.6.2.4 Escritório na fachada sudeste, 3º Piso



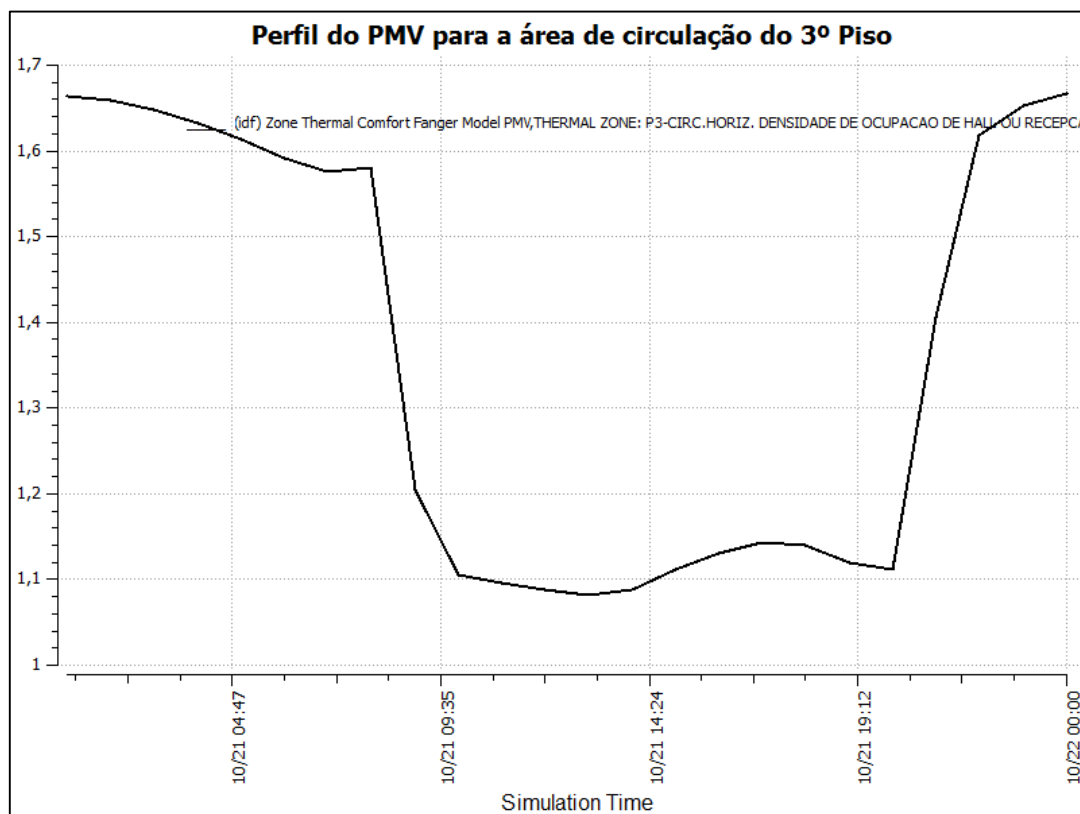
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	387,98
Iluminação	55,38
Equipamentos	88,63
Renovação de Ar	240,73
Cobertura	109,77
Paredes Exteriores	183,94
Paredes Interiores	27,60
Piso	34,67
Janelas(Condução)	73,87
Rad. Solar Janelas	292,73
Total	1560,28
Consumo anual de energia térmica	4,10 GJ



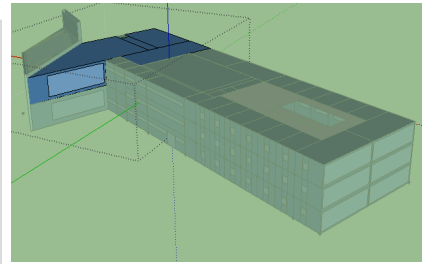
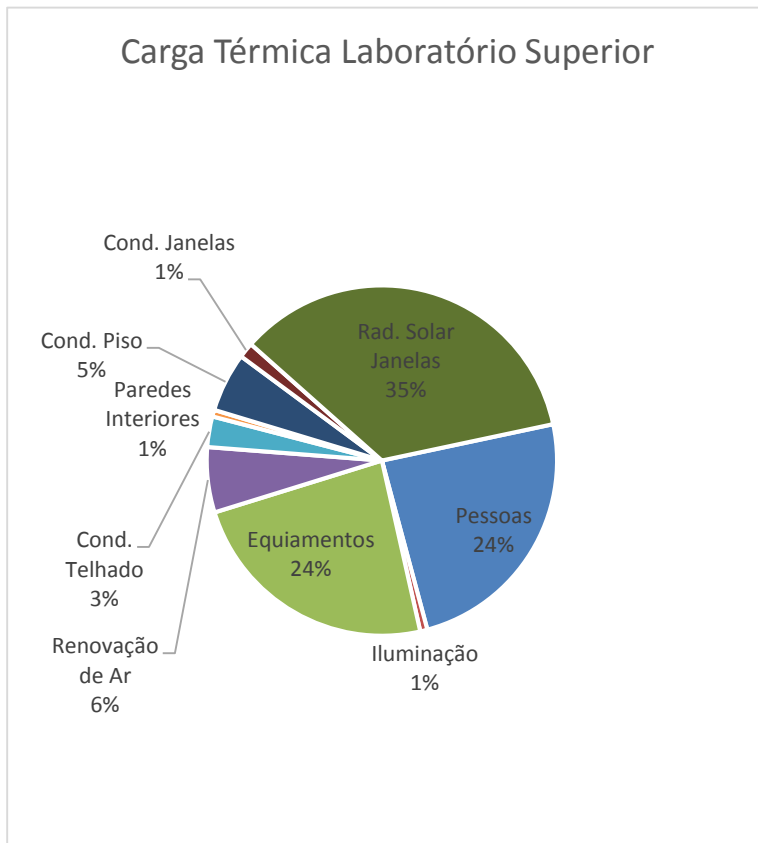
5.6.2.5 Área central de circulação na fachada noroeste, 3º Piso



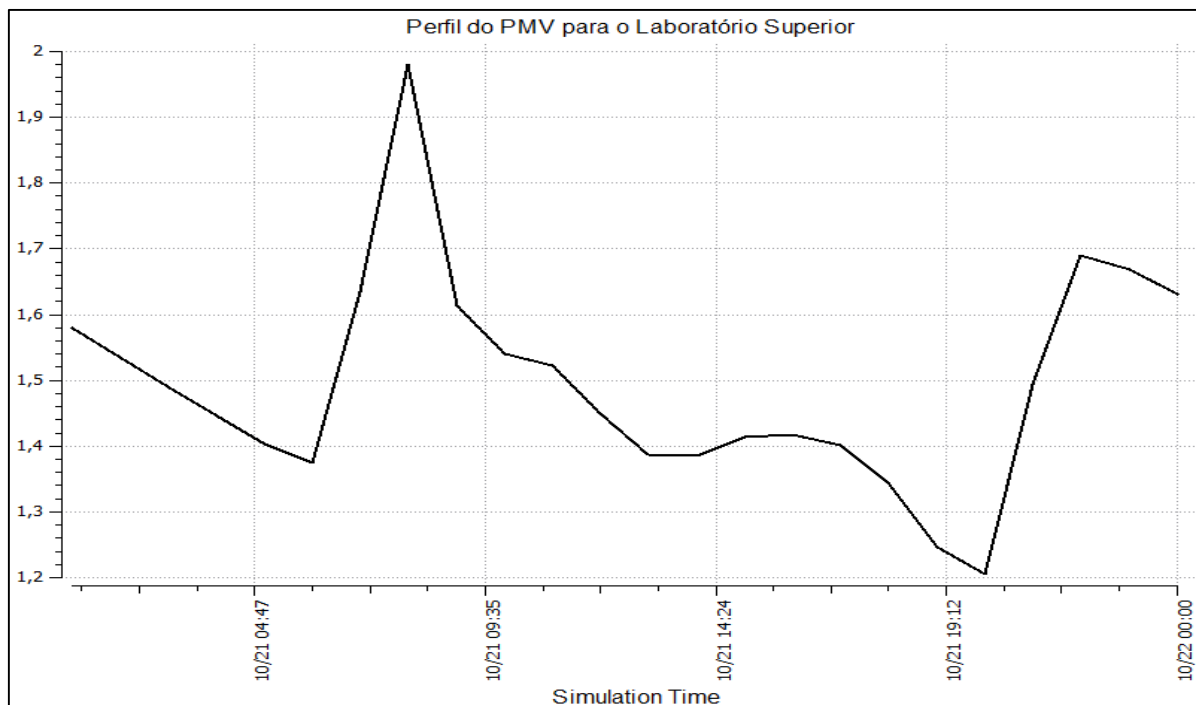
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	387,98
Iluminação	55,38
Equipamentos	88,63
Renovação de Ar	240,73
Cobertura	109,77
Paredes Exteriores	183,94
Paredes Interiores	27,60
Piso	34,67
Janelas(Condução)	73,87
Rad. Solar Janelas	292,73
Total	1560,28
Consumo anual de energia térmica	29,40 GJ



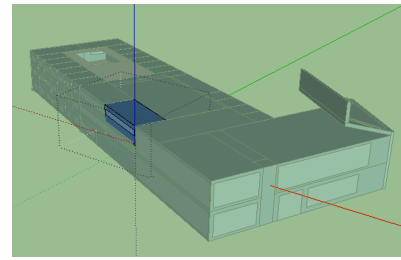
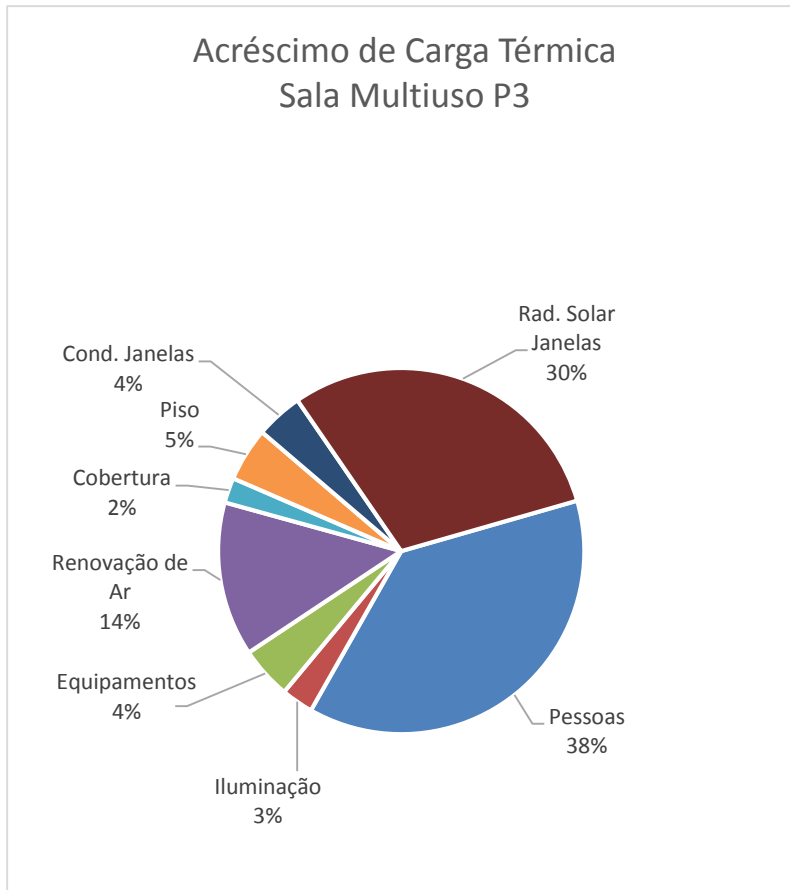
5.6.2.6 Laboratório Superior



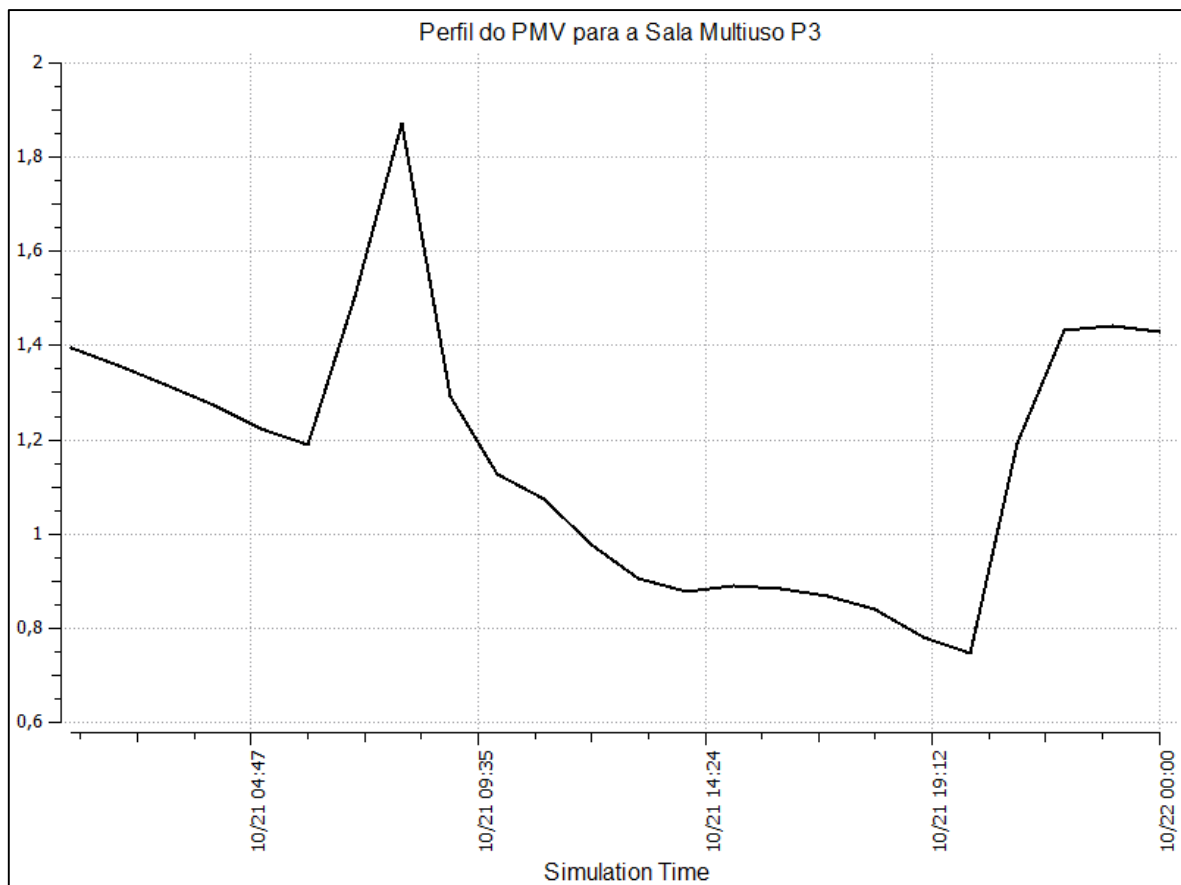
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	18747,49
Iluminação	518,15
Equipamentos	18505,51
Renovação de Ar	4690,85
Cobertura	2200,91
Paredes Exteriores	-7380,14
Paredes Interiores	482,21
Piso	4164,13
Janelas(Condução)	1107,11
Rad. Solar Janelas	27370,25
Total	70406,47
Consumo anual de energia térmica	312,11 GJ



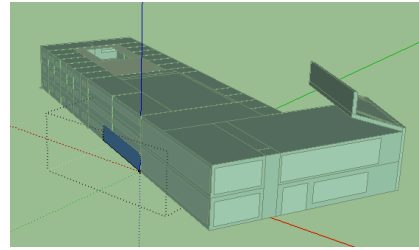
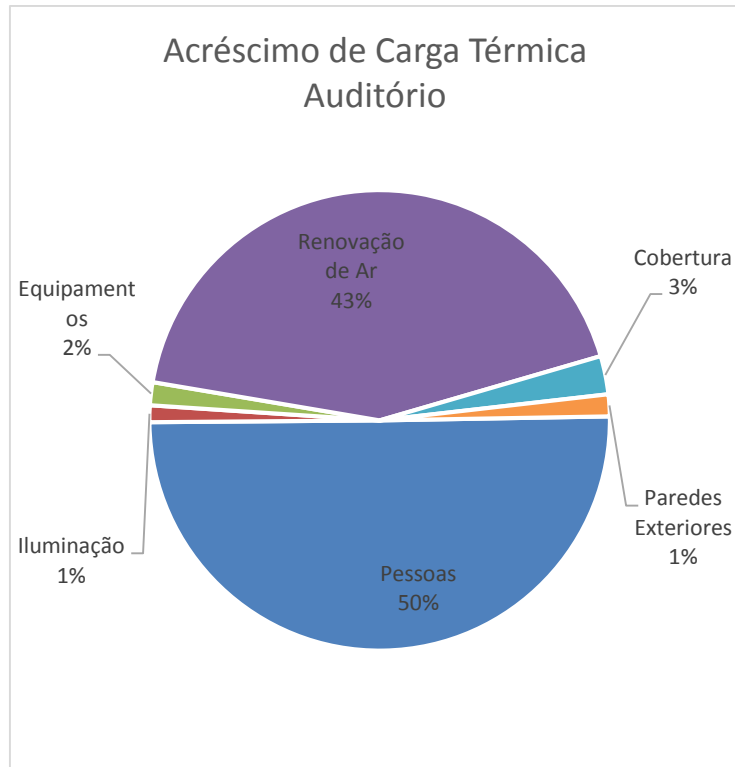
5.6.2.7 Sala multiuso da fachada sudeste, 3º Piso



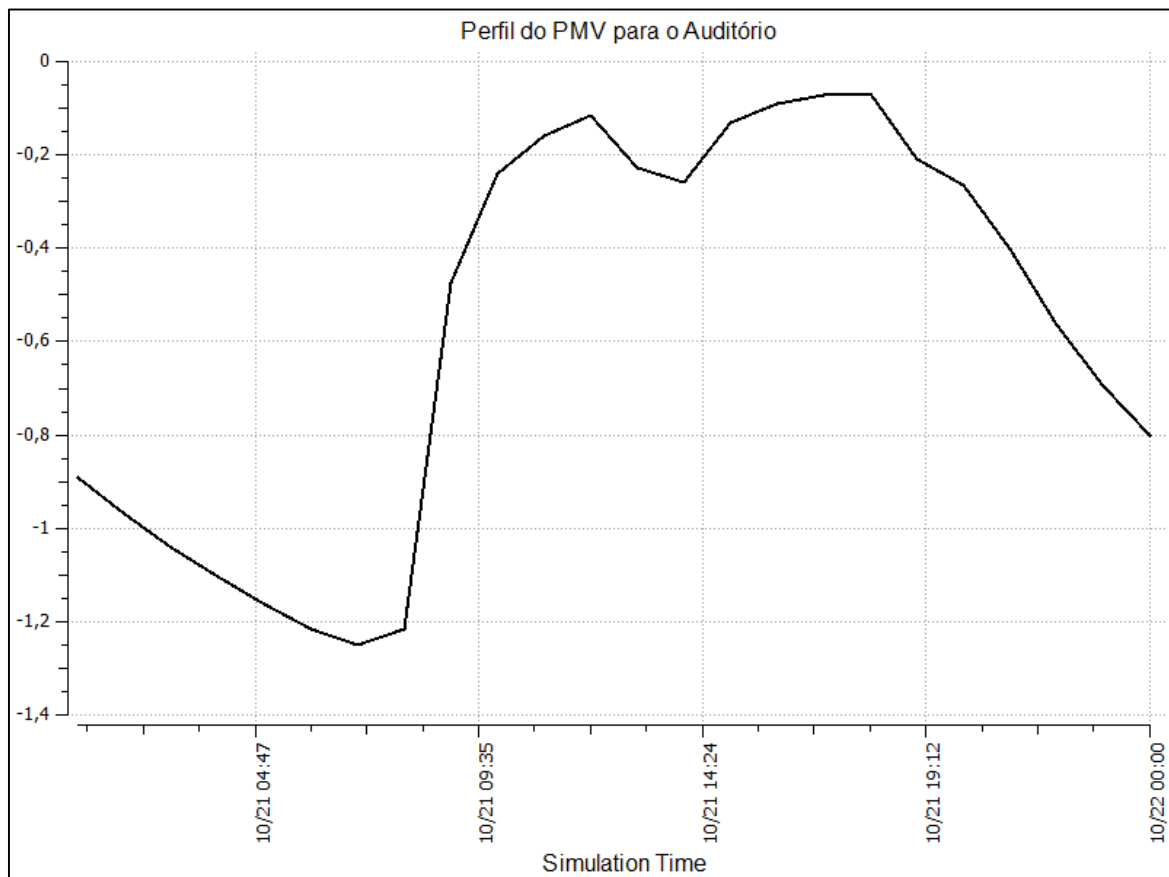
Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	3073,55
Iluminação	230,84
Equipamentos	376,82
Renovação de Ar	1113,13
Cobertura	181,01
Paredes Exteriores	-268,7
Paredes Interiores	-189,7
Piso	387,86
Janelas(Condução)	338,99
Rad. Solar Janelas	2460,54
Total	7704,30
Consumo anual de energia térmica	26,61 GJ



5.6.2.8 Auditório, 1º Piso



Origem da Carga	Total [W]
Pessoas	18.911,94
Iluminação	443,32
Equipamentos	607,95
Renovação de Ar	16.151,64
Cobertura	1.015,70
Paredes Exteriores	578,46
Paredes Interiores	-532,70
Piso	-2.714,20
Condução Portas	-1.128,60
Total	33.333,50
Consumo anual de energia térmica	123,47 GJ



5.7 Análise dos resultados

Os resultados do acréscimo de carga térmica mostrados nos gráficos permitem avaliar a contribuição de cada fator no consumo anual de energia térmica. Dessa maneira, os ajustes na otimização do edifício podem ser direcionados para os fatores que mais contribuem em carga, visando causar maior redução no consumo.

Verifica-se que em todos os casos em que existem janelas nos ambientes, a radiação solar foi responsável pela maior parte da carga, com parcelas de até 45%. Adicionalmente, as janelas adicionam parcela considerável de calor também por condução. Uma terceira contribuição das janelas na carga térmica pode ser constatada: a energia liberada pelos pisos dos ambientes com grandes envidraçados, pois a radiação, ao incidir sobre os mesmos, armazena energia na sua massa, que será liberada gradativamente ao ambiente.

A dissipação do calor causada por pessoas aparece como outro fator que contribuiu muito para a carga. Além da dissipação pelo próprio corpo humano, o número de pessoas é determinante na vazão de ar a ser renovado, outro importante contribuinte no valor da carga térmica. No entanto, não é aceitável a redução da taxa de ocupação para níveis inferiores aos comumente adotados nos edifícios comerciais.

A cobertura traz contribuições variadas de acordo com o ambiente. Em alguns casos, o seu impacto chega a 16% da carga total.

O ganho de calor pelas paredes é predominantemente pequeno, sendo até mesmo negativo em muitos ambientes, pois o calor acaba sendo rejeitado pelas paredes. No entanto, nos escritórios a sua contribuição aumenta, atingindo uma porcentagem máxima de 14% no escritório da fachada noroeste.

A condução de calor pelos pisos tem contribuição pequena, como era de se esperar, já que os ambientes inferiores aos analisados também estão climatizados. Os únicos locais em que a sua contribuição aumenta são os que possuem fração considerável de envidraçados, de maneira que a radiação solar ao incidir sobre o piso, lhe transfere energia que é armazenada e liberada em atraso posteriormente.

Iluminação e equipamentos juntos apresentam contribuições médias de 8% sobre a carga total. O valor é consideravelmente baixo em virtude das lâmpadas e equipamentos de alta eficiência adotadas.

5.8 Otimização térmica do edifício

Da contribuição de cada componente na carga térmica, foram realizadas alterações nas configurações que se mostraram preponderantes na contribuição para a carga.

As alterações foram realizadas buscando atingir as condições de conforto térmico no seu interior com o menor gasto de energia possível. Inicialmente os parâmetros foram alterados isoladamente a os

resultados analisados. Num segundo momento, analisaram-se os resultados de forma combinada. Em ambos os casos, o resultado a ser avaliado será o consumo de energia térmica anual do edifício.

5.8.1 Envidraçados

Haja vista que a entrada de calor pelos envidraçados constitui a maior parte da carga térmica observada nos ambientes, três alterações foram introduzidas nas mesmas com o objetivo de reduzir ao máximo a entrada de calor.

As alterações foram realizadas de forma gradual nas três etapas abaixo descritas:

- 1) As janelas dos laboratórios e dos escritórios da extremidade sudeste/sudoeste foram reduzidas. Nos laboratórios, as janelas foram reduzidas para um metro de altura. Nos escritórios, a altura fixada foi de 0,6 metro.
- 2) O material dos envidraçados foi trocado para o apresentado na Tabela 15;
- 3) Foram colocados sombreamentos horizontais de 1,5 metro de comprimento para o exterior

Os resultados podem ser observados na Figura 36, onde a energia térmica consumida para climatizar o edifício é apresentada para o edifício original e para as três otimizações. Em complemento, a Figura 37 apresenta as alterações da carga térmica em função da alteração na configuração das janelas.

Verifica-se que a inclusão das três alterações nas janelas resultou em uma redução de 41,50% no consumo final de energia térmica e de 65,9% na carga térmica. Poder-se-ia analisar o resultado da alteração dos vidros e dos sombreamentos de forma individualizada com o intuito de verificar o impacto individual de cada solução. Essa análise seria importante visto que a alteração dos vidros e a inclusão dos sombreamentos resultam em aumento no custo para a construção do edifício. No entanto, considerando que a presente edificação tem fins experimentais e não comerciais, de maneira que o custo do edifício, apesar de fazer parte de um parte da análise, não é fator determinante, serão adotadas todas as alternativas que reduzirem o consumo de energia. Portanto, não será realizada uma análise da viabilidade econômica de tais alterações visto que não é o foco desse trabalho.

Como a redução foi muito significativa, as alterações deverão ser incorporadas no modelo final.

Tabela 15: Propriedades dos novos envidraçados

Material	Coefficiente de Transferência de Calor U [W/m ² .K]	Fator Solar []	Transmitância Visível []
Vidro de controle solar (6mm)	2,8	0,33	0,68
Câmara de ar seco (12 mm)			
Vidro Laminado Incolor (6mm)			

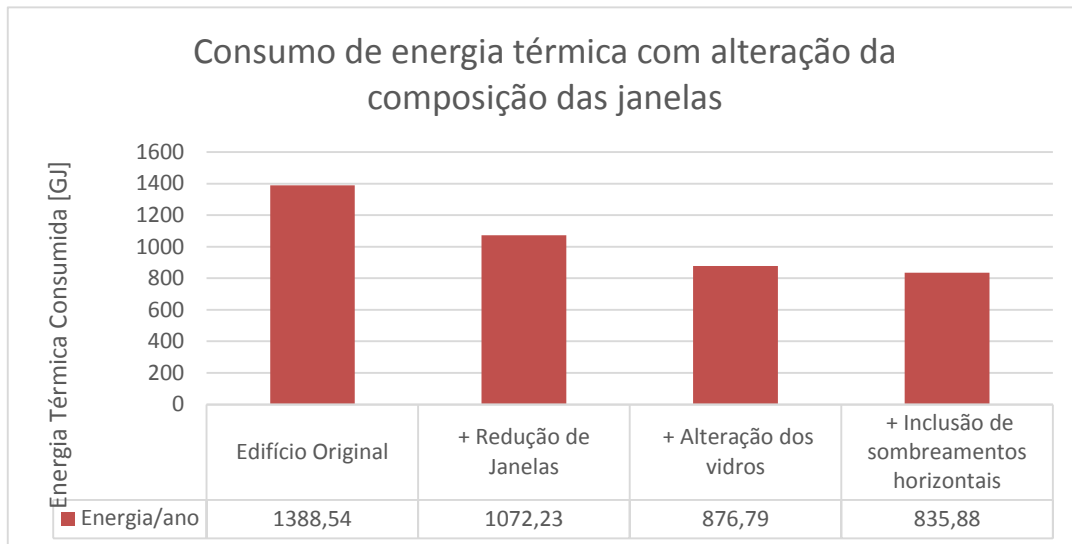


Figura 36: Consumo de energia térmica com a otimização das janelas

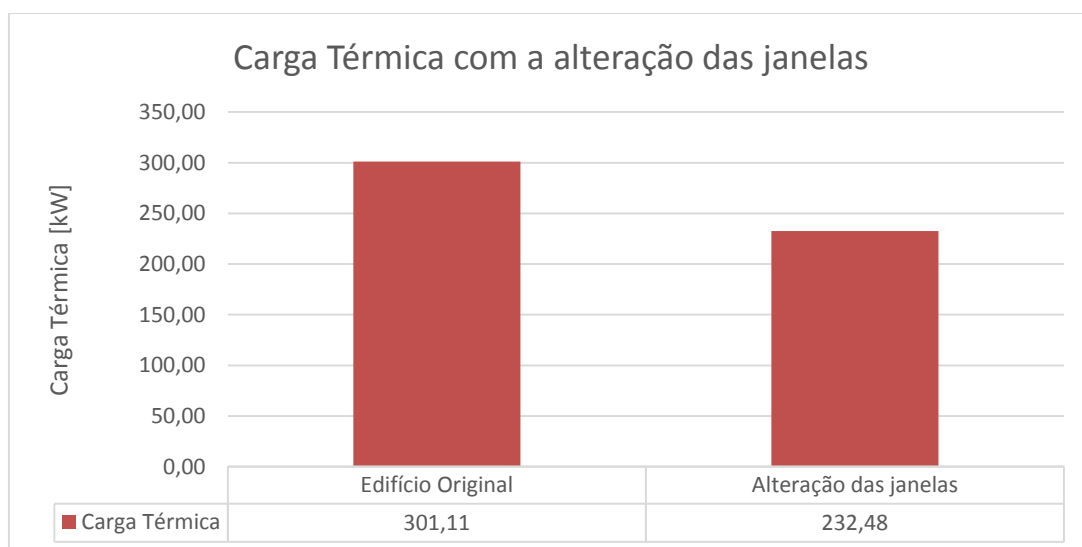


Figura 37: Alteração da Carga Térmica com a modificação das janelas

5.8.2 Composição das paredes

As paredes exteriores foram alteradas com o objetivo de reduzir a transferência de calor do exterior para o interior e aumentar a inércia térmica da construção.

5.8.2.1 1ª Etapa – Redução da transferência de calor com a inclusão de isolamento térmico

Aumentou-se a resistência térmica das paredes adicionando isolante térmico do tipo de lã de rocha na camada mais exterior, antes da parede receber o reboco.

A adição da camada de isolamento térmico reduziu o coeficiente global de transferência de calor das paredes de 3,41 W/m².K para 0,28 W/m².K.

Tabela 16: Propriedades das paredes com o aumento da resistência térmica

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Tijolo Furado	0,09	0,90	1600,0	920,0	0,7
Isolante Térmico – Lã de Rocha	0,150	0,045	50,0	750,0	0,7
Reboco Externo	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
<i>Exterior</i>					

5.8.2.2 2ª Etapa – Aumento da massa com a inclusão de camada de concreto

Aumentando a massa das paredes, objetiva-se elevar a sua inércia térmica e “amortecer” os picos de carga térmica. A elevação da massa foi conseguida por meio da introdução de uma camada de concreto de 10 cm antes da camada composta pelo tijolo furado. Por conseguinte, o coeficiente global de transferência de calor das paredes foi consequentemente alterado de 3,41 W/m².K para 2,85 W/m².K.

Tabela 17: Propriedades das paredes com aumento com aumento de massa

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Concreto	0,10	1,75	2400,0	1000,0	0,6
Tijolo Furado	0,09	0,90	1600,0	920,0	0,7
Reboco Externo	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
<i>Exterior</i>					

5.8.2.3 3ª Etapa – Redução da transferência de calor e aumento da massa

Nessa etapa, as paredes exteriores foram alteradas com o objetivo de reduzir a transferência de calor do exterior para o interior e aumentar a inércia térmica da construção.

A transferência de calor pelas paredes foi reduzida adicionando isolante térmico do tipo de lã de rocha na camada mais exterior seguida de uma câmara de ar, antes do reboco. O resultado dessa alteração foi uma redução do coeficiente global de transferência de calor das paredes de 3,41 W/m².K para 0,26 W/m².K.

A alteração da inércia térmica foi realizada incluindo a camada de concreto, do realizado na 2ª Etapa.

As paredes interiores permaneceram como no modelo original.

Tabela 18: Propriedades dos materiais constituintes da parede

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Concreto	0,10	1,75	2400,0	1000,0	0,6
Tijolo Furado	0,09	0,90	1600,0	920,0	0,7
Isolante Térmico – Lã de Rocha	0,150	0,045	50,0	750,0	0,7
Câmara de ar	Resistência Térmica Equivalente = 0,15 m ² .K/°C				
Reboco Externo	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
<i>Exterior</i>					

5.8.2.4 Resultados

Foram avaliados os impactos das alterações no consumo anual de energia térmica e na carga térmica.

Os resultados mostrados na Figura 38 apontam para um aumento de aproximadamente 8% do consumo de energia térmica com as alterações na composição da parede. Na Figura 39, mostra-se que também foi observado aumento na carga térmica. A causa dos aumentos é complexa, visto que esse impacto é fruto do comportamento térmico dinâmico do edifício. Diante disso, salienta-se que não se pode generalizar o resultado encontrado para outros casos. Apenas se conclui que, especificamente para

o edifício em análise, o aumento da resistência e inércia térmica não são recomendadas, pois resultam no aumento do seu consumo de energia anual.

Em virtude dos aumentos evidenciados, essas alterações não serão incorporadas ao modelo proposto. No entanto, visto que o edifício tem fins experimentais, recomenda-se que o projeto arquitetônico contemple a possibilidade de alteração nas propriedades térmicas das paredes com o objetivo de avaliar o impacto real dessas alterações e comparar com o resultados simulados.

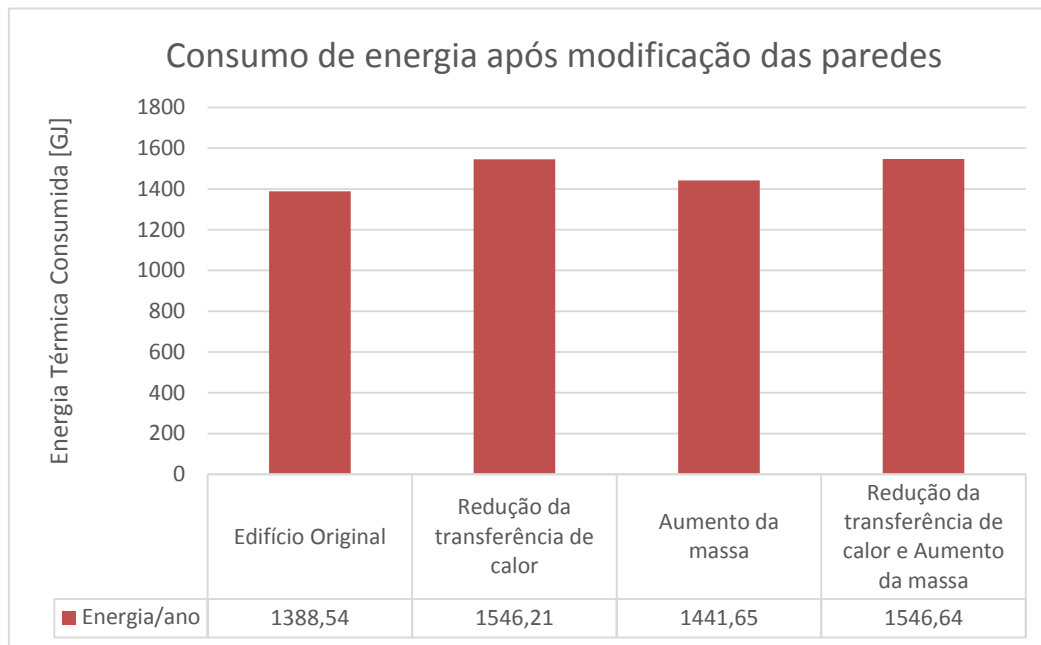


Figura 38: Consumo de energia térmica com a alteração das paredes

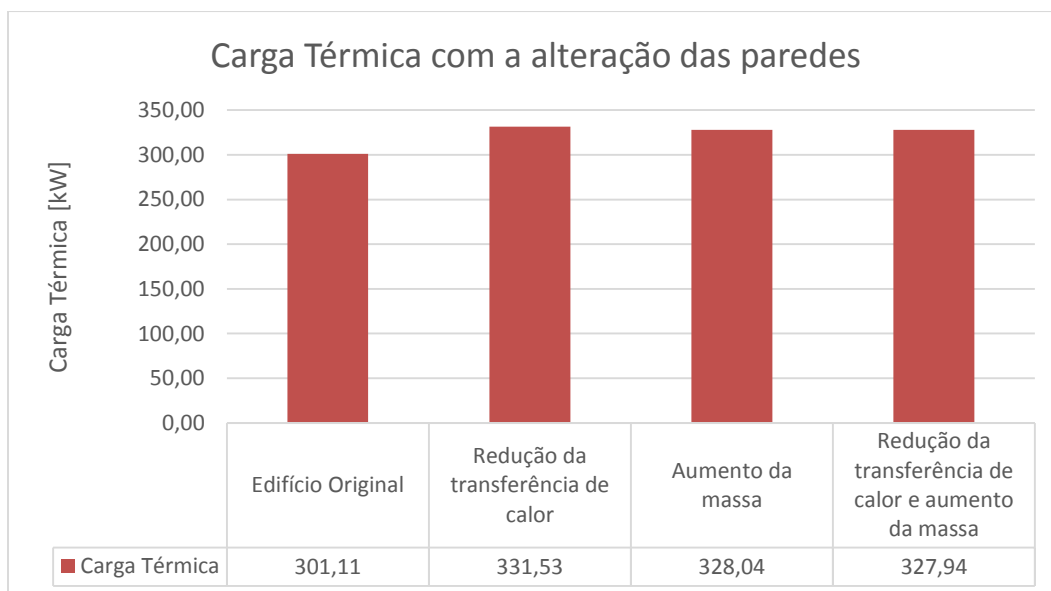


Figura 39: Carga térmica conforme a alteração das paredes

5.8.3 Alteração da composição da cobertura

A cobertura foi alterada, incluindo um isolamento térmico e um contra piso para assentamento das cerâmicas. Cogitou-se adotar um teto verde, mas considerando a necessidade de instalar os painéis fotovoltaicos, os mesmo resultariam em muita sombra, impossibilitando o cultivo do gramado.

Com os resultados mostrados na Figura 40 e na Figura 41, verifica-se que houve um aumento no consumo de energia térmica após a otimização das janelas. A carga térmica manteve-se aproximadamente constante, visto que sofreu uma redução menor que 1%.

Isto posto, a alteração na composição da cobertura não será incorporada ao modelo definitivo já que não resultaria em uma redução na capacidade do sistema, e levaria a um maior consumo de energia térmica.

Tabela 19: Propriedades dos materiais da nova cobertura

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Gesso	0,013	0,16	784,9	830,0	0,92
Concreto	0,10	1,75	2400,0	1000,0	0,6
Isolante Térmico – Lã de Rocha	0,25	0,045	50,0	750,0	0,7
Câmara de ar	Resistência Térmica Equivalente = 0,18 m ² .K/°C				
Contra Piso	0,05	0,90	1600,0	920,0	0,7
Cerâmica de Pedra Clara	0,025	1,80	2560,0	790,0	0,2
<i>Exterior</i>					

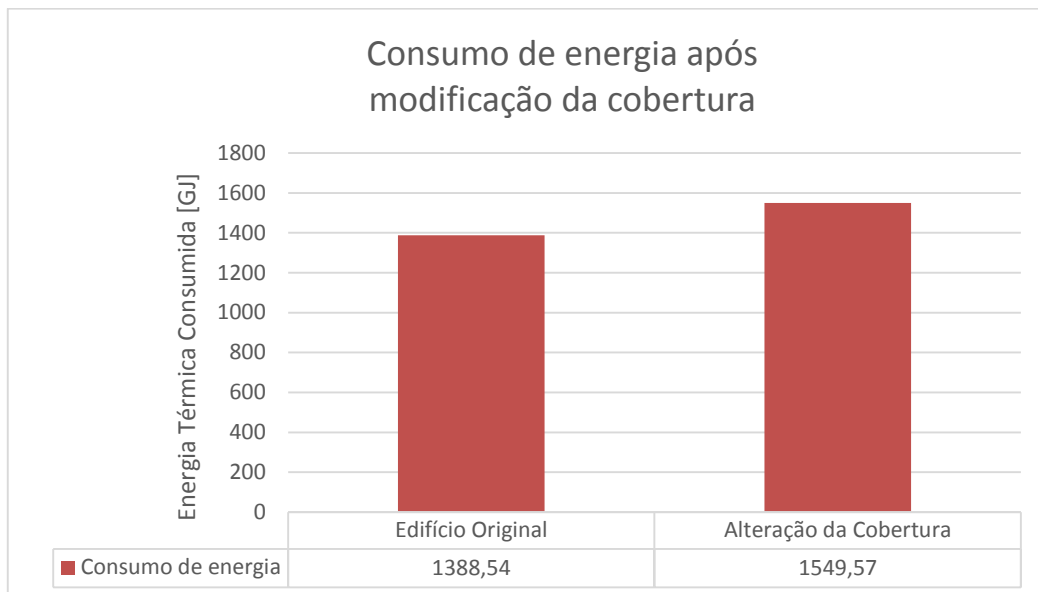


Figura 40: Consumo de energia térmica com a alteração da cobertura

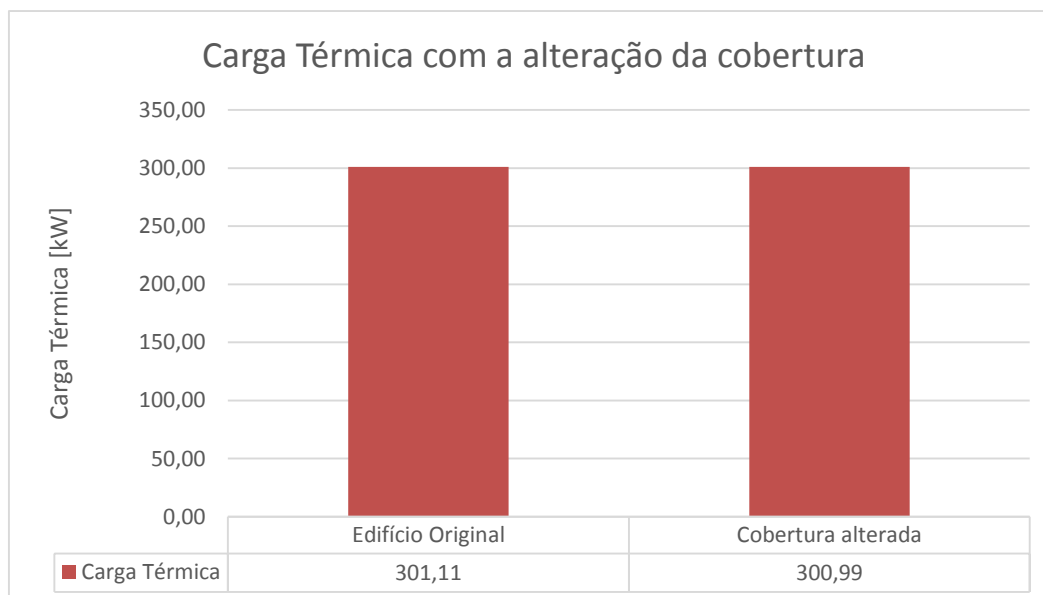


Figura 41: Carga térmica com a alteração da cobertura

5.8.4 Inclusão de sombreamento sobre a cobertura

Para amenizar o efeito da radiação solar sobre a cobertura do edifício, foi introduzido um sombreamento sobre toda a cobertura, criando uma área de ventilação de 0,5 metro entre o sombreamento e a alvenaria da laje. Esse sombreamento poderá servir de suporte para os painéis fotovoltaicos que serão instalados sobre o edifício. Dessa maneira, o ganho seria ainda maior visto que a camada de sombreamento criaria uma barreira também para o calor proveniente do aquecimento dos painéis fotovoltaicos.

Os resultados do impacto da inclusão do sombreamento no consumo de energia e carga térmica são apresentados na Figura 42 e na Figura 43.

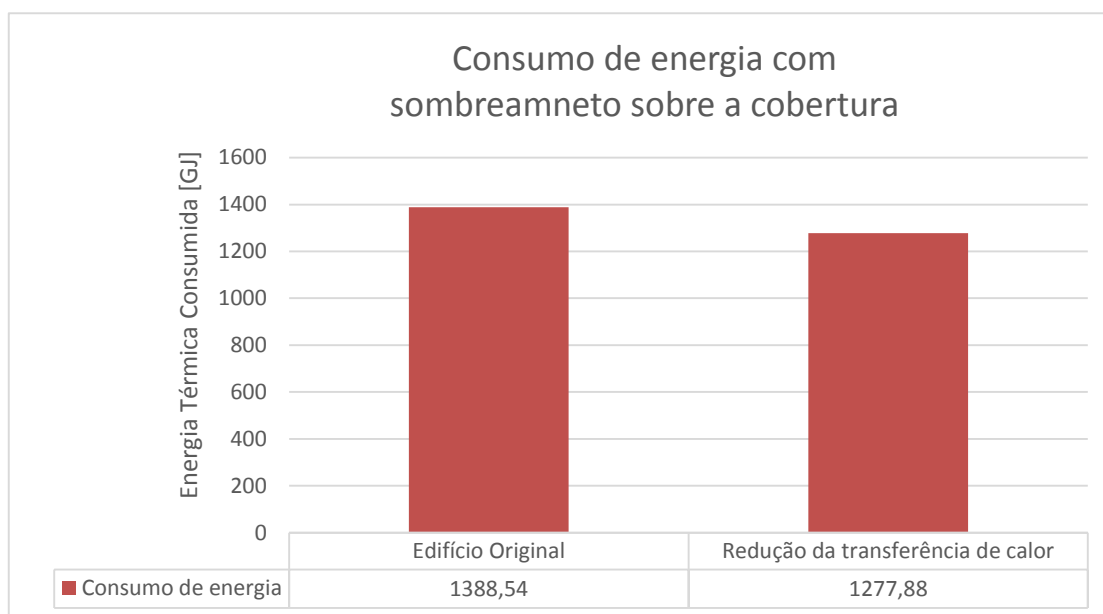


Figura 42: Consumo de energia com sombreamento sobre a cobertura

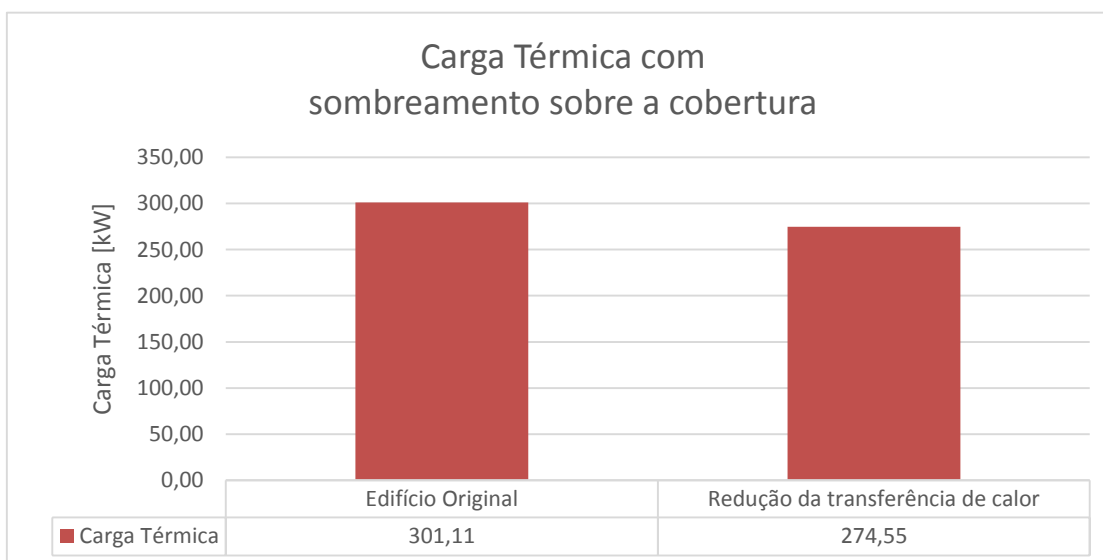


Figura 43: Carga térmica com sombreamento sobre a cobertura

Dos resultados, verifica-se uma redução de aproximadamente 8% no consumo de energia e 9% na carga térmica. Diante das reduções apresentadas, considera-se válido a inclusão do sombreamento no modelo original.

5.8.5 Edifício final otimizado

Após as diversas etapas de otimização, conclui-se que algumas alterações sugeridas prejudicariam o desempenho térmico do edifício, em contradição ao esperado, visto que as indicações teóricas apontam

para uma tendência na redução da carga térmica com o aumento da inércia e resistência térmica dos materiais construtivos. No entanto, em decorrência do comportamento dinâmico de um edifício quando analisado ao longo das 8760 horas de um ano, podem ocorrer contradições entre as indicações teóricas iniciais e os resultados de simulação, visto que o número de variáveis analisadas é tão amplo que não permite conceito teóricos completamente rígidos. Considera-se importante questionar os resultados simulados, mas após a conferência das entradas das simulações, não resta alternativa a não ser considerar os resultados obtidos. Se o edifício for efetivado, os resultados poderão ser validados com o modelo real construído.

A informação sobre o acesso aos arquivos digitais do modelo de simulação do edifício no *EnergyPlus* e *OpenStudio* é dada no ANEXO 9.6.

Portanto, serão adotados na versão final do modelo apenas as alterações das janelas, propostas no item 5.8.1, e a inclusão do sombreamento sobre a cobertura, proposta no item 5.8.4. Esse modelo segue apresentado na Figura 44.

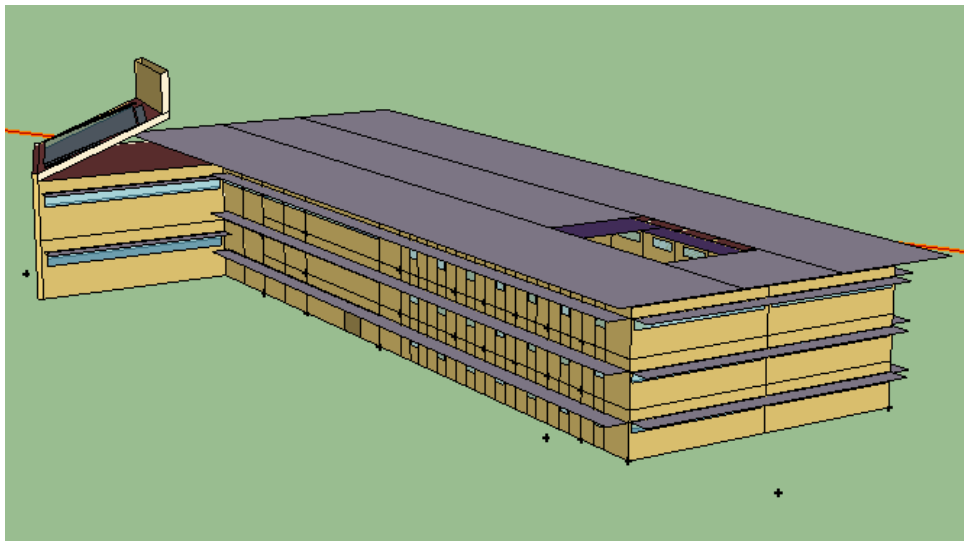


Figura 44: Modelo térmico final de simulação após as otimizações

Os resultados para esse modelo de simulação apontam para uma redução de 27,24% na carga térmica do edifício original. O valor final do pico de carga térmica simultânea do edifício é de 219,10 kW ou 62,3 toneladas de refrigeração.

As características construtivas definitivas do edifício e os resultados da simulação são apontados nos itens seguintes.

Após a apresentação dos resultados, será analisado o conforto térmico por meio do perfil do PMV para o dia de projeto nos ambientes típicos no intuito de verificar se as condições interiores passaram a ser satisfatórias. Caso o perfil do PMV ainda aponte para desconforto térmico, os termostatos desses locais serão regulados buscando atingir as condições de conforto e a carga térmica reavaliada.

5.8.5.1 Paredes

Tabela 20: Propriedades das paredes otimizadas

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Reboco Interno	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
Tijolo Furado	0,09	0,90	1600,0	920,0	0,7
Reboco Externo	0,025	1,15	1858,0	837,0	0,2
<i>Exterior</i>					

5.8.5.2 Janelas

Tabela 21: Propriedades dos vidros utilizados nas janelas otimizadas

Material	Coefficiente de Transferência de Calor U [W/m².K]	Fator Solar []	Transmitância Visível []
Vidro de controle solar (6mm)	2,8	0,33	0,68
Câmara de ar seco (12 mm)			
Vidro Laminado Incolor (6mm)			

5.8.5.3 Cobertura

Tabela 22: Propriedades da cobertura otimizada

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Gesso	0,012	0,16	784,9	830,0	0,92
Concreto	0,10	1,75	2400,0	1000,0	0,6
Cerâmica de Pedra	0,025	1,80	2560,0	790,0	0,5
<i>Exterior</i>					

5.8.5.4 Pisos

Tabela 23: Propriedades dos pisos

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.K]	Absortância Solar []
<i>Interior</i>					
Laje de Concreto	0,10	0,90	1600,0	920,0	0,7
Cerâmica de Pedra	0,025	1,80	2560,0	790,0	0,5
<i>Exterior</i>					

5.8.5.5 Resultados

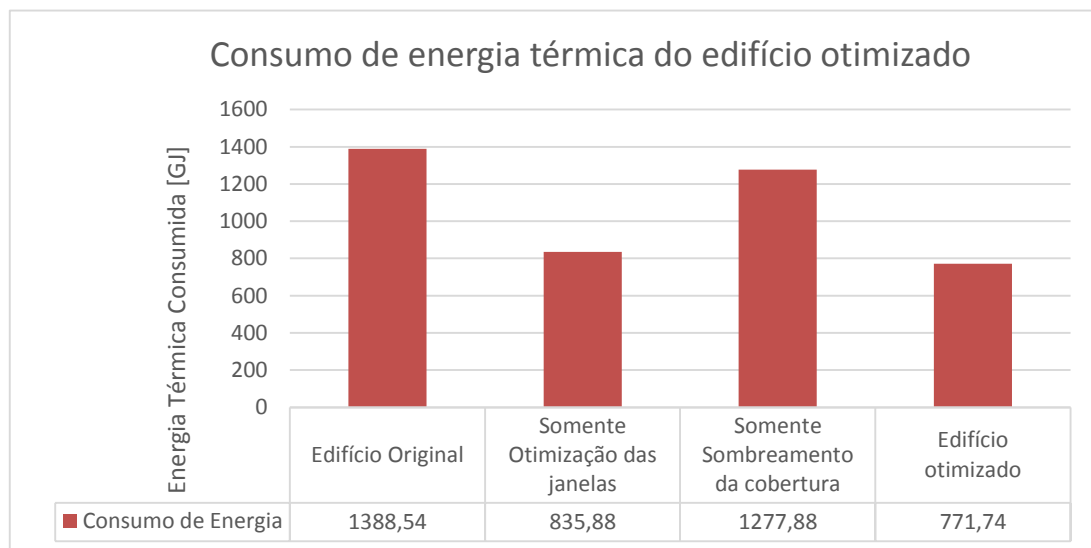


Figura 45: Evolução na redução do consumo de energia térmica para o edifício otimizado

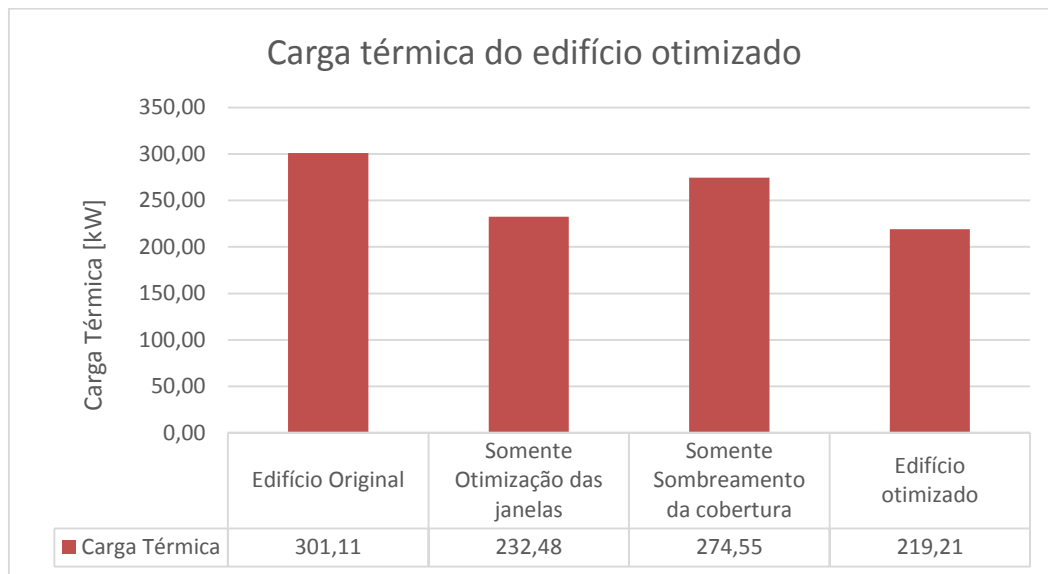


Figura 46: Evolução na redução de carga térmica para o modelo otimizado

5.8.5.6 Análise do conforto térmico e ajuste final dos termostatos

Com as otimizações integradas ao modelo, serão reanalisadas as condições de conforto térmico por meio do PMV para o dia de projeto em cada um dos ambientes de referência. Os resultados são apresentados na Figura 47 para os ambientes de referência. Verifica-se que com um limite máximo de 23°C ainda não se atingiu as condições de conforto para o período de ocupação de dois ambientes, mostrados pelas linhas tracejadas: a área central de circulação do 3º Piso e o laboratório de experimentação do piso superior.

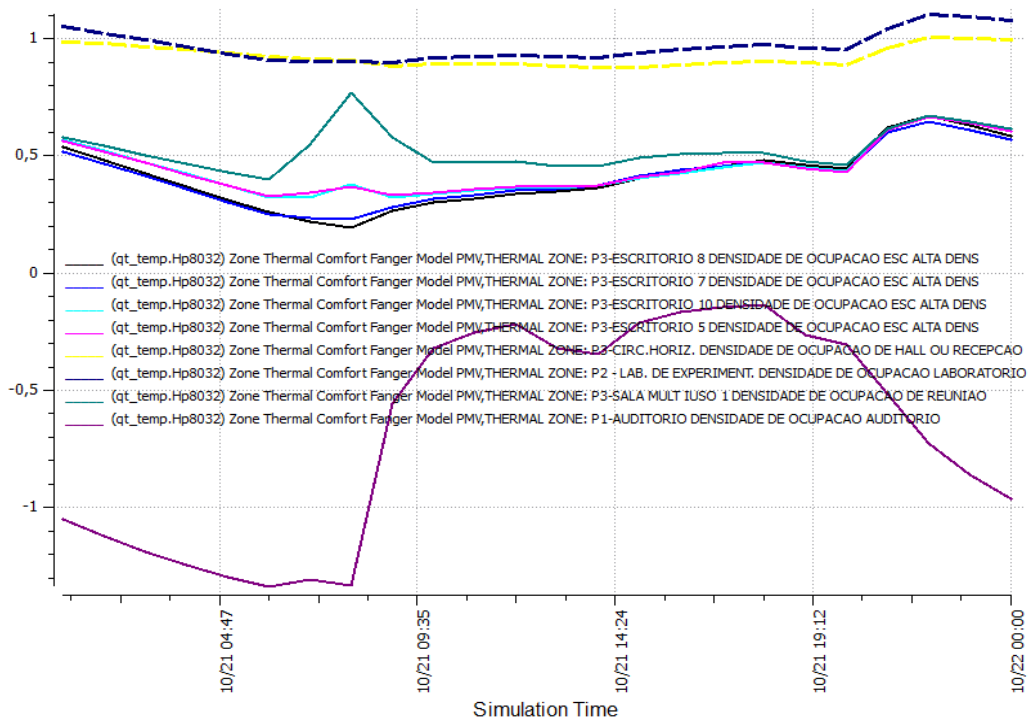


Figura 47: PMV para os ambientes de referência no dia de projeto

Diante do verificado, analisou-se os demais ambientes do edifício semelhantes aos que apresentaram desconforto térmico. A Figura 48 mostra o perfil do PMV para esses ambientes: as áreas de circulação horizontal dos três pisos e os dois laboratórios. Verifica-se que em todos os casos as condições de conforto térmico não foram atingidas nas horas de ocupação. No entanto, os ambientes em contato com o solo se mostraram com comportamento térmico mais adequado, visto que o seu PMV não ultrapassa o valor de 0,85.

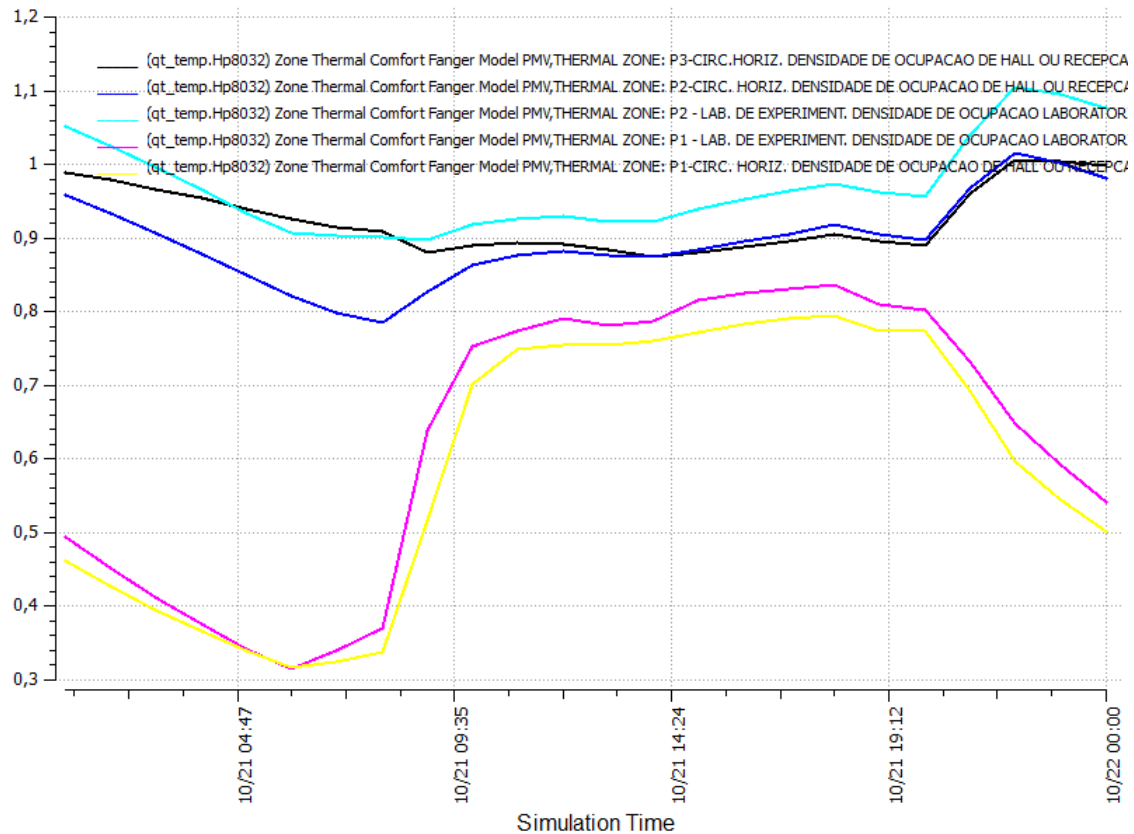


Figura 48: PMV para ambientes em desconforto

Diante do verificado, os termostatos desses ambientes foram reajustados para um novo limite superior de temperatura de 20,5°C buscando a manutenção do conforto térmico nesses ambientes. Com o ajuste, o perfil do PMV para esses ambientes torna-se adequado para as condições de conforto, conforme mostrado na Figura 50. O único ambiente que manteve valores de PMV um pouco acima de 0,5 foi o Laboratório de Experimentação Superior. Dessa maneira, os termostatos serão mantidos nessa regulagem visando não acarretar em consumo excessivo de energia por parte do sistema de climatização.

Em consequência da necessária redução de temperatura dos ambientes, a carga térmica total do edifício aumentou para 255,13 kW, conforme apresenta a Figura 49. Verifica-se com isso, um impacto de 14% no aumento da carga térmica total do edifício somente por se reduzir a temperatura dos dois laboratórios e áreas de circulação.

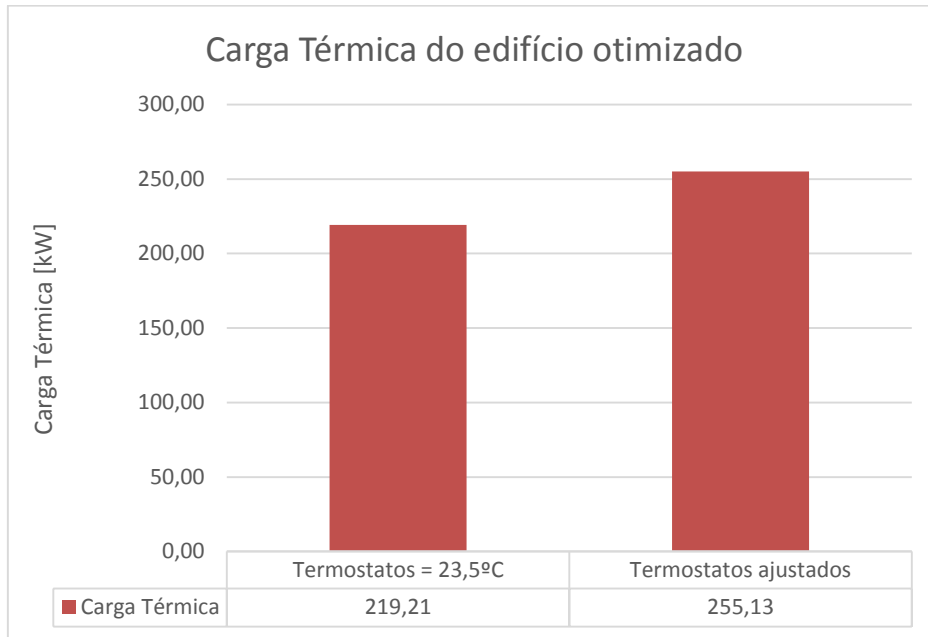


Figura 49: Modificação na carga térmica em virtude do ajuste dos termostatos para as condições de conforto

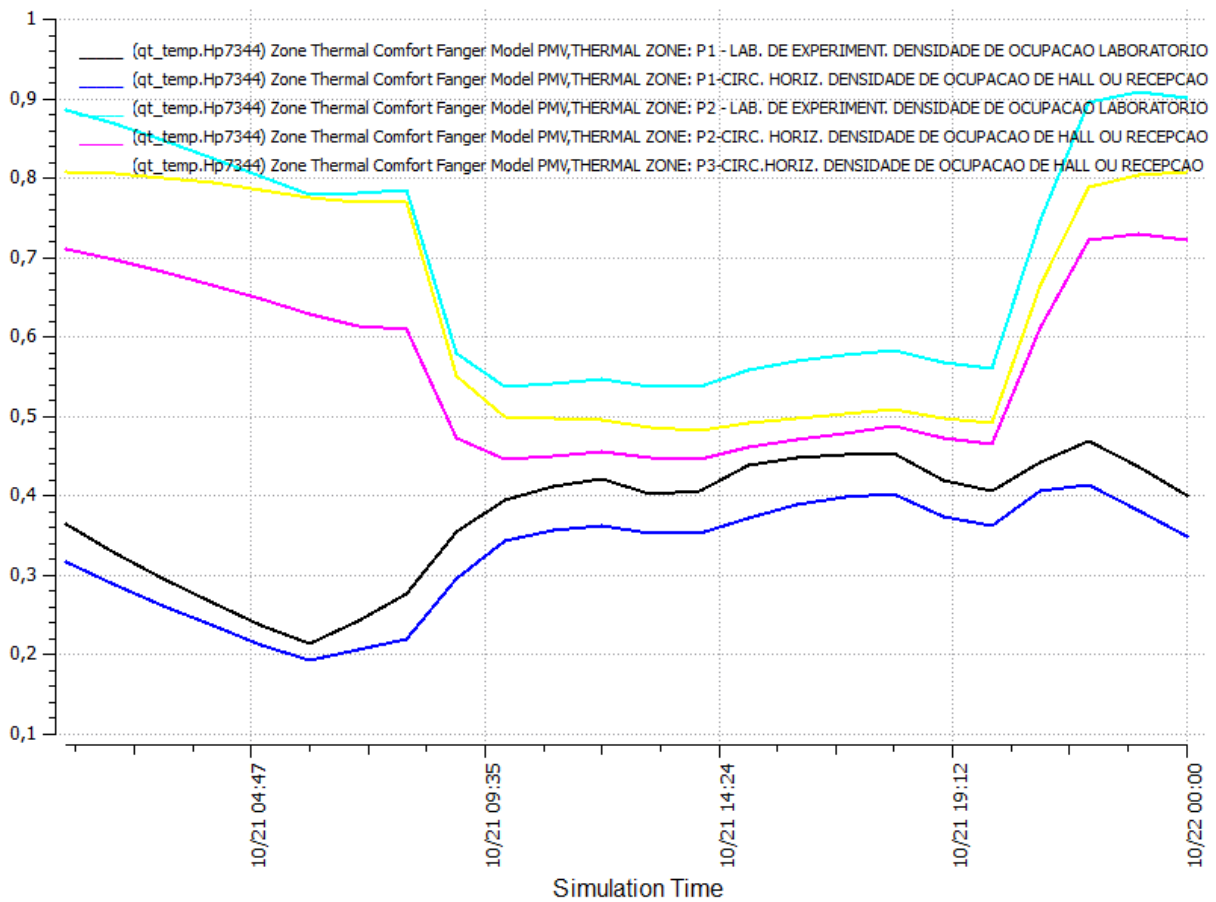


Figura 50: Perfil do PMV para os ambientes críticos com termostatos regulados para 20,5°C

6 ANÁLISE ENERGÉTICA

O balanço de energia levou em consideração o consumo e a produção de energia. O consumo foi avaliado para todas as demandas elétricas do edifício incluindo o sistema de climatização, iluminação e equipamentos. A produção de energia levou em consideração a utilização de painéis fotovoltaicos.

6.1 Consumo de energia

A energia elétrica consumida foi simulada para cada hora de um ano típico no *EnergyPlus*, considerando a demanda por iluminação, funcionamento de equipamentos e pelo sistema de climatização.

O consumo por iluminação e equipamentos foi analisado conforme os parâmetros já apresentados na Seção 5.4.6 para cada tipo de espaço. Em suma, foi considerada a utilização de uma estação de trabalho por pessoa para o consumo por equipamentos. As estações de trabalho adotadas foram computadores de alta eficiência energética com uma média de consumo adotada pelo Procel em 20 W por computador portátil (Dombrosky, 2012). A utilização dos equipamentos foi considerada contínua dentro do cronograma de ocupação do edifício. Adicionalmente, foram consideradas utilizações esporádicas de projetores e equipamentos complementares de escritório.

Com relação à iluminação, a simulação foi configurada para considerar um sistema de dimerização que acione a iluminação artificial somente nos momentos em que a radiação solar não for suficiente para iluminar o ambiente adequadamente. As configurações da iluminação artificial foram baseadas em luminárias comercializadas pela Cree, modelo UR2-48, compostas por lâmpadas de LED com eficiência de 102 Lúmens por Watt. A iluminância adotada foi de 500 lux para os locais de trabalho e de 100 lux para as áreas de circulação. Dessa maneira, o sistema de iluminação terá uma taxa máxima de consumo de 4,90 W/m².

Nos sistemas de climatização, foram considerados todas as fontes de consumo incluindo o resfriador de líquido, bombas e ventiladores. Os parâmetros de desempenho desses componentes e a configuração deles no *OpenStudio/EnergyPlus* são apresentados no Capítulo 4, que aborda especificamente o Sistema de Climatização e o seu desempenho.

O consumo total de energia em decorrência de todas as demandas foi de 573,05 GJ/ano ou 159,18 MWh/ano, apresentado dividido por fonte e por mês do ano típico na Tabela 24 e na Figura 51.

Tabela 24: Consumo de energia elétrica por fonte

Consumo de Energia (kWh)													
	Jan	Fev	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
AC - Resfriador de Líquido (Chiller)	4528,1	4277,1	4673,1	4210,9	3855,4	3067,9	2878,4	3462,6	3982,8	4453,7	4321,6	4419,7	48131,1
AC - Ventiladores	547,4	547,8	582,4	512,0	499,5	390,1	366,7	449,7	505,2	558,7	526,1	531,5	6017,9
AC - Bombas	441,4	384,7	451,5	409,1	363,1	290,3	286,0	315,1	355,7	412,4	412,9	432,3	4554,4
Iluminação	1806,1	1641,9	1888,2	1641,9	1888,2	1806,1	1724,0	1888,2	1724,0	1806,1	1806,1	1724,0	21344,6
Equipamentos	6695,9	6087,1	7000,2	6087,1	7000,2	6695,9	6391,5	7000,2	6391,5	6695,9	6695,9	6391,5	79132,9
Total	14018,8	12938,7	14595,4	12861,0	13606,4	12251,1	11646,5	13115,7	12959,1	13926,7	13762,5	13499,0	159180,9

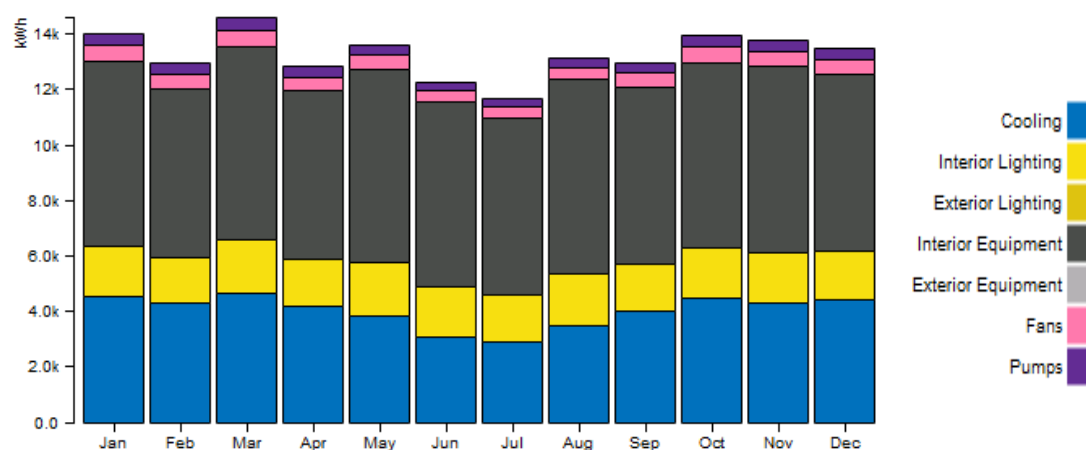


Figura 51: Consumo de energia elétrica por fonte

Da figura, verifica-se que:

- o consumo em virtude dos equipamentos e da iluminação ficou aproximadamente constante ao longo dos meses, o que era de se esperar visto que esses componentes não possuem alteração de uso significativa ao longo das épocas do ano;
- o sistema de climatização, ainda que tenha sido projetado com equipamentos eficientes, é responsável por aproximadamente 37 % do consumo de energia;
- a carga pelo sistema de climatização atinge os seus picos nos meses de março e outubro, como se espera da análise do clima local, visto que nesses meses a temperatura e umidade são mais altas e;

- nos meses de maio a setembro o consumo de energia pelo sistema de climatização é reduzido, como se espera da análise do clima local, já que nesses meses a temperatura e umidade são baixas.

O consumo de energia ao ser dividido pela área do prédio permite a comparação do consumo energético com outros edifícios semelhantes. Essa comparação é apresentada na Tabela 25, onde fica evidenciado o reduzido consumo estimado do edifício proposto em comparação a dados apresentados por Amorim (2004).

Tabela 25: Consumo de energia por área de diversos edifícios

Edifício	Média do consumo energético (kWh/m².ano)
Edifícios de escritório na Europa	250
Palácio do Itamaraty – Brasília	153
Corporate Center – Brasília	145
FUNASA – Brasília	121
Edifícios de escritório em Florianópolis	120
Edifício Varig – Brasília	82
nZEB - UnB	48,54

6.2 Geração de energia

A geração de energia elétrica será realizada por meio de painéis fotovoltaicos instalados na cobertura. Também se propõe a utilização de células fotovoltaicas nas persianas das janelas. As persianas deverão ser reguladas por um sistema de automação que proporcionará o sombreamento máximo no interior do edifício e conseqüentemente a máxima insolação sobre as células fotovoltaicas instaladas na sua superfície.

O sistema de geração será do tipo conectado à rede (SFCR), sem a necessidade de acumuladores de energia. Nesse tipo de sistema, a energia produzida pelos painéis pode ser consumida pela unidade consumidora local ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição (Grupo de Trabalho de Energia Solar, 2014).

A capacidade total do sistema foi obtida avaliando a eficiência do sistema em relação à área efetiva de painéis fotovoltaicos. A área efetiva considerada foi somente metade da área total da cobertura,

cumprindo com o requisito de se manter o espaço adequado entre os painéis, em virtude do sombreamento que um pode causar ao outro. As células das persianas não foram modeladas na simulação em virtude da dificuldade de se considerar o impacto do sombreamento de uma persiana sobre a outra. Diante disso, incluir as células das persianas na simulação poderia resultar num resultado acima do real para a geração de energia, por isso optou-se por analisar o pior caso e considerar apenas a área da cobertura.

Diante do apresentado, a capacidade total foi avaliada por meio da Equação (25), resultando num total de 161,04 kW em corrente contínua. As perdas na conversão da corrente contínua em corrente alternada serão contabilizadas diretamente no software de simulação.

$$Capacidade [kW] = Área\ efetiva[m^2] \times 1 \left[\frac{kW}{m^2} \right] \times \frac{Eficiência\ do\ módulo\ [%]}{100} \quad (25)$$

$$Capacidade [kW] = \frac{Área\ cobertura[m^2]}{2} \times 1 \left[\frac{kW}{m^2} \right] \times \frac{Eficiência\ do\ módulo\ [%]}{100} \quad (26)$$

$$Capacidade [kW] = \frac{1660,22 [m^2]}{2} \times 1 \left[\frac{kW}{m^2} \right] \times \frac{19,4 [%]}{100}$$

$$Capacidade [kW] = 161,04 kW$$

Esse tipo de sistema é regulamentado pela Resolução Normativa da Aneel Nº 482/2012 como Sistema de minigeração distribuída, pois possui potência superior à 100 kW e inferior à 1 MW.

O painel fotovoltaico utilizado para o cálculo da capacidade total do sistema foi o modelo N245 recentemente desenvolvido e comercializado pela *Panasonic*. As configurações do painel são apresentadas na Tabela 26 e o catálogo técnico está disponível nos anexos.

Tabela 26: Especificações do painel fotovoltaico

Eficiência do módulo fotovoltaico	19,4%
Potência máxima nas condições normais de operação	187,4W
Queda de potência em função do aumento de temperatura	- 0,29% / °C
Articulação dos painéis	2 eixos de rotação
Temperatura nominal do painel nas condições normais de operação (NOCT)	44°C
Queda de eficiência em função do aumento de temperatura	-0,29% / °C
Redução de capacidade pelo conversor	0,77

6.2.1 Simulação de produção de energia

O cálculo do potencial de produção de energia anual foi realizado por meio do programa *System Advisor Model* (SAM) disponibilizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

O SAM é um programa de simulação do potencial de geração de energia por meio fotovoltaico, eólico, geotérmico e fruto da biomassa. O software já traz uma interface gráfica amigável onde os diversos sistemas podem ser selecionados, conforme mostra a Figura 52. Após selecionar o sistema de produção de energia fotovoltaica, deve-se iniciar a configuração dos parâmetros climáticos locais, apresentados na Figura 53, por meio de um arquivo climático. O arquivo climático escolhido para Brasília foi o fornecido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, por ser o arquivo que apresentava as piores condições de insolação para o local, novamente buscando uma análise para o pior caso.

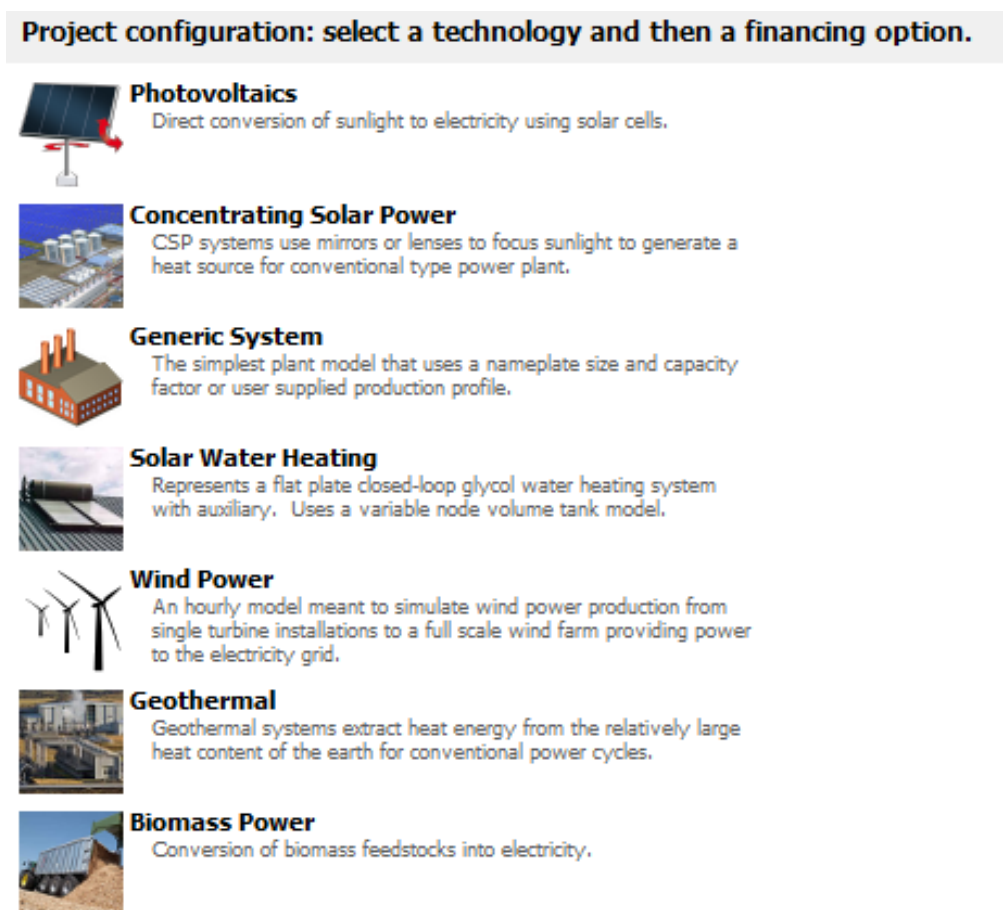


Figura 52: Seleção de sistema no SAM

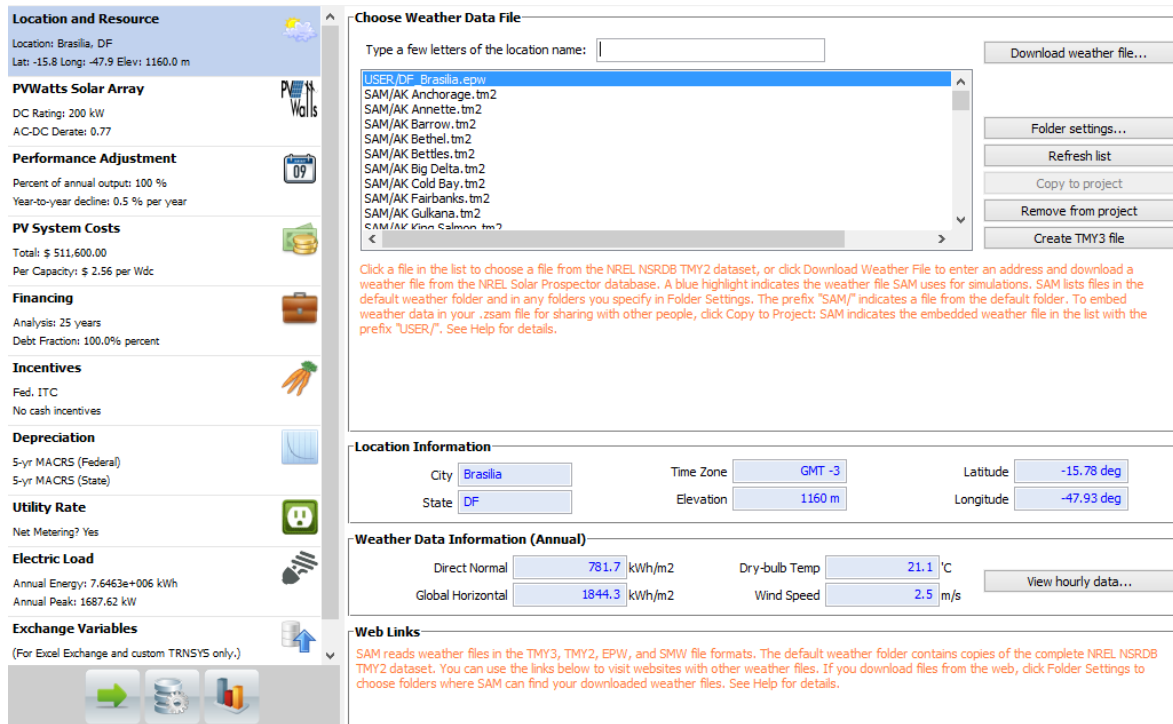


Figura 53: Configuração das condições climáticas locais

Após a configuração das condições climáticas, deve-se inserir no programa os parâmetros de desempenho e da instalação dos painéis, conforme o especificado na Tabela 26. A tela de configuração para esses parâmetros é mostrada na Figura 54. Nessa etapa é possível configurar a capacidade do sistema calculada pela Equação (25), a perda no conversor de corrente contínua para alternada, o número de eixos articulados no painel e as configurações de desempenho térmico do sistema.

As demais opções de modelagem do programa se referem às análises de viabilidade econômica do investimento e não foram abordadas por não serem o foco desse trabalho.

Por fim, basta que se pressione a seta verde no canto inferior esquerdo da tela para que os cálculos sejam executados. Ao fim dos cálculos o programa exibe a tela de resultados, Figura 55, que permite a extração de uma grande quantidade de informações.

Location and Resource

Location: Brasília, DF
Lat: -15.8 Long: -47.9 Elev: 1160.0 m

PWatts Solar Array

DC Rating: 161.04 kW
AC-DC Derate: 0.77

Performance Adjustment

Percent of annual output: 100 %
Year-to-year decline: 0.5 % per year

PV System Costs

Total: \$ 411,940.32
Per Capacity: \$ 2.56 per Wdc

Financing

Analysis: 25 years
Debt Fraction: 100.0% percent

Incentives

Fed. ITC
No cash incentives

Depreciation

5-yr MACRS (Federal)
5-yr MACRS (State)

Utility Rate

Net Metering? Yes

Electric Load

Annual Energy: 7,6463e+006 kWh
Annual Peak: 1687.62 kW

Exchange Variables

(For Excel Exchange and custom TRNSYS only.)

PWatts System Inputs

System nameplate capacity: 161.04 kWdc
DC to AC derate factor: 0.77 (0..1)
Array tracking: 2 Axis
Tilt: 33 deg
 Force Tilt = Latitude
Azimuth: 180 deg

Tilt: horizontal=0, vertical=90
Azimuth: north=0, east=90, south=180, west=270

Shading

Define shading scene:

Advanced: Module thermal behavior

Installed nominal operating cell temp (INOCT): 44 C
Temperature coefficient: -0.29 %/C

Advanced: POA irradiance input

Use measured plane-of-array irradiance as model input

Enter hourly POA irradiance data: Wh/m2

POA values assume the measurement is taken at the midpoint of the hour. Meteorological data is taken from the weather file. See Help for details.

Figura 54: Configuração dos parâmetros de desempenho do painel fotovoltaico e da instalação

Location and Resource

Location: Brasília, DF
Lat: -15.8 Long: -47.9 Elev: 1160.0 m

PWatts Solar Array

DC Rating: 161.04 kW
AC-DC Derate: 0.77

Performance Adjustment

Percent of annual output: 100 %
Year-to-year decline: 0.5 % per year

PV System Costs

Total: \$ 411,940.32
Per Capacity: \$ 2.56 per Wdc

Financing

Analysis: 25 years
Debt Fraction: 100.0% percent

Incentives

Fed. ITC
No cash incentives

Depreciation

5-yr MACRS (Federal)

View and export data:

Add a new graph...

Monthly Output

Metric	Value
Annual Energy	196,546 kWh
LCOE Nominal	10.34 ¢/kWh
LCOE Real	8.15 ¢/kWh
Electricity cost without system	\$ 907,835.06
Electricity cost with system	\$ 892,786.19
Net savings with system	\$ 15,048.94
Net present value (\$)	\$ -79,840.36
Payback (years)	1. #DIV!
Capacity Factor	13.9 %
First year kWhac/kWdc	1,220

Monthly Output

After Tax Cashflow

Annual Output

Cost per Watt

Stacked Real LCOE

Stacked Nominal LCOE

Figura 55: Tela de resultados do SAM

6.2.2 Resultado da simulação de geração de energia

Os resultados da simulação apontaram para uma produção anual de 196,55 MWh anuais de energia elétrica distribuídos mensalmente conforme mostrado na Figura 56. Análises complementares mostraram a importância de um painel com eficiência energética de ponta, pois os convencionais resultaram em uma queda maior na produção de energia, principalmente nos meses de inverno. A opção de painéis com dois eixos de rotação resultou em um aumento na produção de energia de 9,24% em relação aos painéis de única articulação, e de 11,84% em relação aos painéis fixos.

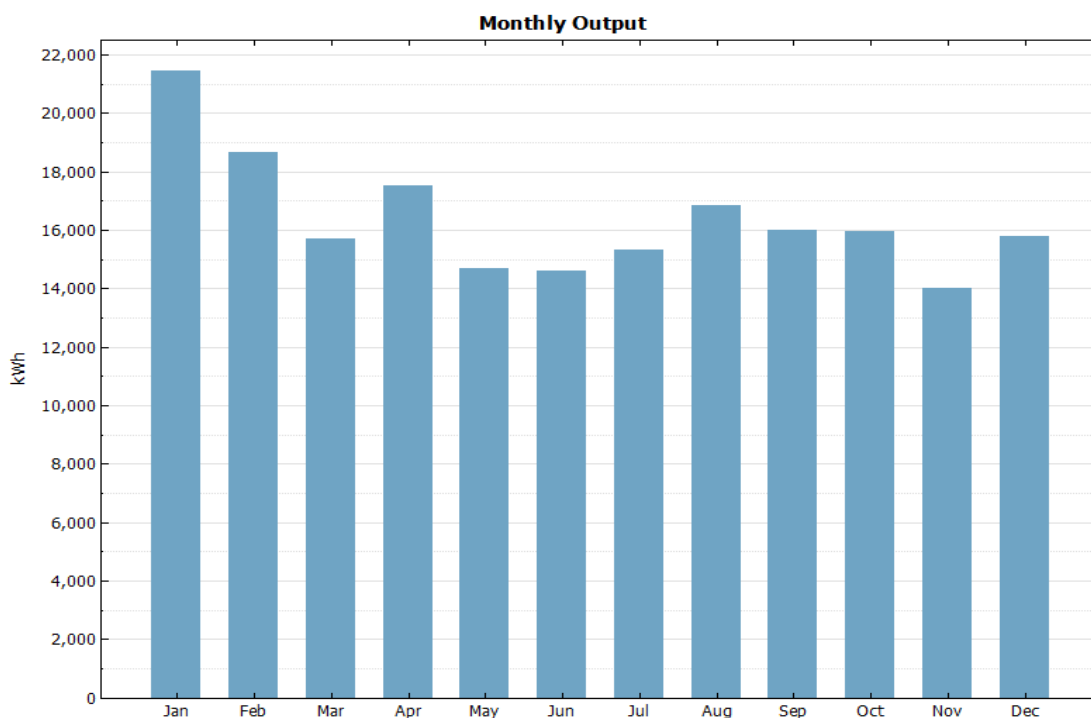


Figura 56: Produção mensal de energia pelo sistema fotovoltaico

6.3 Balanço de energia

Os resultados entre as simulações realizadas no *EnergyPlus* para o consumo de energia, e no SAM para a produção, apontam para um balanço que supera a meta do balanço energético nulo em aproximadamente 23,5 % no primeiro ano de análise, conforme mostrado graficamente na Figura 57. Após 15 anos, estima-se uma redução desse percentual para 6 %, em virtude da queda de eficiência dos equipamentos, tanto de consumo quanto de produção de energia, mantendo no entanto a meta do nZEB.

Em virtude da superação elevada alcançada, podem ser questionadas alterações que permitam um conforto térmico mais rigoroso por meio de uma maior abrangência do sistema de água gelada, ou que economizem a área coberta por painéis fotovoltaicos, reduzindo o investimento inicial no edifício.

No entanto, a busca pela excelência em eficiência justifica o emprego das tecnologias mais avançadas no edifício, possibilitando assim todo o tipo de experimentação. Além disso, por se tratar de um caso experimental, os equipamentos apresentados nesse trabalho seriam a base de funcionamento do edifício, que poderia, no entanto, ser atendido por diversas outras soluções possibilitando um vasto campo de pesquisa acerca da produção e consumo de energia em instalações prediais.

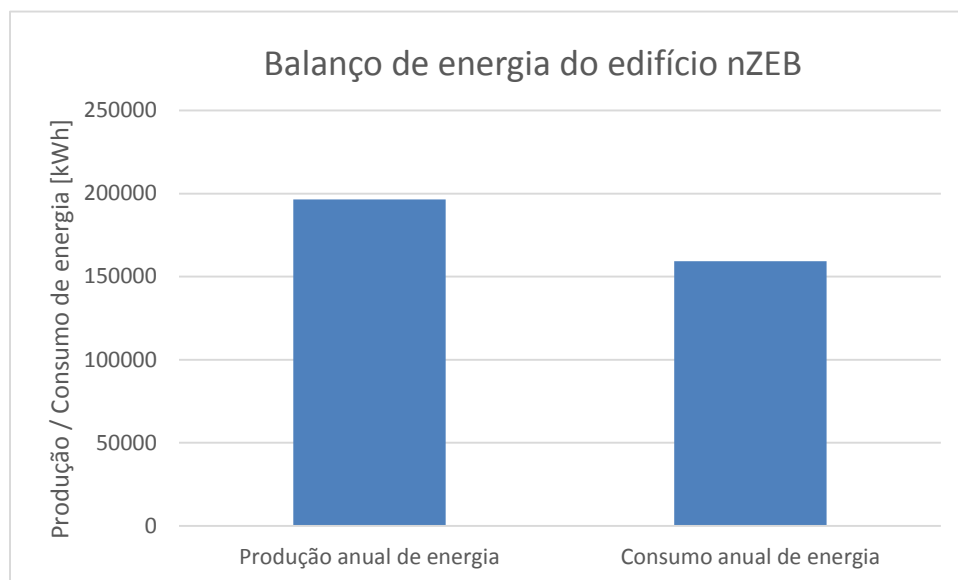


Figura 57: Balço de energia do edifício nZEB

7 CONCLUSÃO

O edifício proposto é uma solução de alta performance energética, apresentando um consumo anual de energia reduzido quando comparado à média de outros edifícios de escritório em diversas partes do mundo.

A localização do edifício é privilegiada para o acesso ao público da universidade, que possibilitará à comunidade acadêmica um espaço de excelência em pesquisas de soluções de eficiência energética.

O clima local é o tropical de altitude com períodos de chuvas bem definidos. A temperatura máxima chega a 34 °C, tornando indispensável um sistema de climatização nos períodos mais quentes. No entanto, o clima é propício para o emprego de soluções passivas e semi-passivas de climatização, em virtude da intensidade dos ventos e da combinação de condições climáticas que favorecem essas alternativas.

A proposta arquitetônica desenvolvida pela equipe parceira contemplou a necessidade de um edifício eficiente, principalmente do ponto de vista térmico.

Resultados de simulações térmicas demonstraram a necessidade de climatização ativa, visto que o PMV dos ambientes atingia níveis fora das condições de conforto, mesmo fazendo uso da ventilação natural. Com a implementação de otimizações, a carga térmica do prédio resultou em 219,21 kW.

Análises da contribuição de cada componente na carga térmica evidenciaram a predominante contribuição dos envidraçados na carga, mostrando a importância da adoção de um vidro com características otimizadas e de sombreamentos sobre as janelas.

A climatização do edifício por meio da combinação de duas soluções diferenciadas fez com que o consumo de energia em consequência dos sistemas de ar condicionado fosse reduzido, estimado em 58.700 kWh/ano. Essa redução foi alcançada utilizando somente soluções passivas e semi-ativas em um dos sistemas que deve atender os ambientes sem necessidades críticas de conforto térmico.

O consumo de energia simulado foi de 159,18 MWh/ano, 23,5 % inferior à produção, simulada em 196,55 MWh/ano. O consumo por área é de 48,54 kWh/m².ano, muito inferior aos dados encontrados para edifícios comerciais.

Dos resultados, conclui-se que o ideal *nZEB* foi atingido com sucesso, havendo uma margem de consumo de energia que ainda permite a adoção de equipamentos com maior consumo, sistemas de climatização de maior controle das condições de conforto, ou uma redução na quantidade ou eficiência dos painéis fotovoltaicos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ideal EPDB*. [Online] [Citado em: 07 de Outubro de 2013.] <http://www.ideal-epbd.eu/>.
- Next Generation Lighting Industry Alliance with the U. S. Department of Energy. 2008.** *Reporting Led Luminaire Product Performance - An Initiative for Better Solid-State Lighting*. 2008.
- ABNT. 2005.** NBR 15215-1 Iluminação Natural - Parte 1. 2005.
- . **2008.** *NBR 16401: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários*. Rio de Janeiro : ABNT, 2008.
- . **2013.** *NBR ISO/CIE 8995 Iluminação de ambientes de trabalho*. 2013.
- . **2013.** *NBR ISO/CIE 8995-1:2013 - Iluminação de Ambientes de Trabalho - Parte 1: Interior*. 2013.
- Altemani, C. 1976.** Estudo de aquecedores solares de convecção natural para secagem. Campinas, São Paulo : Departamento de Engenharia Mecânica, 1976.
- 2009.** Ambiente Gelado. [Online] 2009. [Citado em: 08 de Agosto de 2013.] <http://www.ambientegegado.com.br/>.
- Amorim, Cláudia Naves David. 2004.** *Arquitetura não residencial em Brasília: Desempenho energético e ambiental*. São Paulo : s.n., 2004.
- ANEEL.** [Online] [Citado em: 04 de Outubro de 2013.] <http://www.aneel.gov.br/>.
- ASHRAE . 2005.** *ASHRAE Handbook-Fundamentals*. 2005.
- Benkert, St., Heidt, F. D. e Scholer, D. .** *Calculation Tool for Earth Heat Exchangers GAEA*. Siegen, Alemanha : Department of Physics, University of Siegen.
- Birck, Márcia. 2014.** Apresentação do projeto arquitetônico de edificação experimental nZEB para a UnB. 2014.
- . **2013.** Proposta de Edificação nZEB Experimental para a Universidade de Brasília - Apresentação da Arquitetura. Brasília : s.n., 29 de Novembro de 2013.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - Departamento de Desenvolvimento Energético. 2010.** *Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas*. 2010.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - Empresa de Pesquisa Energética -. 2007.** *Matriz Energética Nacional 2013*. 2007.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. 2013(b) .** Balanço Energético Nacional. 2013(b) .
- . **2013.** MME. *Ministério de Minas e Energia*. [Online] 2013. [Citado em: 04 de Outubro de 2013.] www.mme.gov.br/mme.
- . **2013(a) .** *Resenha Energética Brasileira - Exercício 2012*. 2013(a) .
- Bundesministerium fur Wirtschaft und Technologie. 2013.** EnOB: Research for Energy Optimized Construction. [Online] 2013. [Citado em: 29 de Outubro de 2013.] <http://www.enob.info/en/>.
- Chungloo, S. e Limmeechokchai, B. 2006.** A numerical study of natural ventilation in buildings: utilized solar chimney and cool ceiling. Bangkok, Tailândia : s.n., 2006.

- Comissão Europeia.** *Eficiência Energética - Comissão Europeia.* [Online] http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_en.htm.
- Cree.** 2013. *2013 LED Lighting Catalog.* 2013.
- Dombrosky, Robson Fernandes.** 2012. Eficientização de um sistema de climatização aeroportuário a partir do uso da termoacumulação. São Leopoldo : s.n., 2012.
- Eletronorte.** 2013. Eletronorte. [Online] 2013. [Citado em: 13 de Outubro de 2013.] <http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/para/>.
- Em direção a energia zero.* **Portugal, Ministério da Economia, da Inovação e Desenvolvimento.** 2010. Lisboa : LNEG, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2010.
- EnergyStar.** [Online] [Citado em: 04 de Outubro de 2013.] www.energystar.gov/index.cfm.
- European Commission - Ecofys: Politecnico di Milano / eERG: University of Wuppertal.** 2012. *Towards nearly zero-energy buildings.* 2012.
- Farias, Leonel Marques e Sellito, Miguel Afonso.** *Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.*
- Fernandes, E. Oliveira e Castro, M. Dias de .** 2008. *Texto de Apoio às Aulas Práticas.* Porto : s.n., 2008.
- Ferreira, André Guimarães, et al.** 2006. *Balanço Energético de uma Chaminé Solar.* 2006. p. 8.
- Frank, B.** 1981. Convecção induzida pelo sol: chaminé solar. Porto Alegre, Rio Grande do Sul : s.n., 1981.
- Garrocho, Juliana Saiter.** 2005. *Luz Natural e projeto de arquitetura.* Brasília : s.n., 2005.
- Grupo de Trabalho de Energia Solar.** 2014. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.* Rio de Janeiro : s.n., 2014.
- Hollmuller, Pierre e Lachal, Bernard.** *Cooling and preheating with buried pipe system: monitoring, simulation and economic aspects.* p. 10.
- Hollmuller, P.** 2002. *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments.* Genève : Universidade de Genebra, 2002.
- Incropera, Frank P., et al.** 2008. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.* Rio de Janeiro : LTC, 2008.
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.** *INMET.* [Online] [Citado em: 01 de Dezembro de 2013.] www.inmet.gov.br.
- Kunetz, J. e Lefebvre, L.** 2004. *Les puits provençaux. Etude et méthode de dimensionnement.* 2004. p. 54.
- LabEEE.** 2009. *Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus.* Florianópolis : s.n., 2009.
- . 2010. *Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas.* Florianópolis : s.n., 2010.
- . 2008. *Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus.* Florianópolis : s.n., 2008.
- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.** 2008. *Relatório de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus.* Florianópolis : s.n., 2008.

- Leal, Vítor e Kaspalaki, Maria. 2012.** [Online] 26 de Junho de 2012. [Citado em: 08 de Agosto de 2013.] <http://www.lneg.pt/>.
- LNEG.** Investigação para a Sustentabilidade. [Online] [Citado em: 08 de Agosto de 2013.] <http://www.lneg.pt/>.
- Maciel, Alexandra Albuquerque. 2002.** *Projeto Bioclimático em Brasília: Estudo de Caso em Edifício de Escritórios*. Florianópolis : s.n., 2002.
- Manual de Iluminação Eficiente.* **Rodrigues, Pierre. 2002.** 2002, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL.
- Martins, R. R. et al. 2002.** Secador de Grãos com uso de energia solar. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul : s.n., 2002.
- Mir-Babayev, Mir Yusif.** Azerbaijan's Oil History - A Chronology Leading up to the Soviet Era. [Online] <http://azer.com/aiweb/categories/magazine/>.
- Neves, Leticia de Oliveira. 2012.** *Chaminé Solar como Elemento Indutor de Ventilação Natural em Edificações*. Campinas, SP : s.n., 2012.
- NREL.** NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. [Online] [Citado em: 08 de Agosto de 2013.] <http://www.nrel.gov/>.
- . **2010.** *Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options*. 2010.
- Pacto de Autarcas.** [Online] [Citado em: 07 de Outubro de 2013.] www.pactodeautarcas.eu.
- Pless, Shanti e Torcellini, Paul . 2010.** *Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options* . Colorado - EUA : s.n., 2010.
- PROCEL.** [Online] [Citado em: 04 de Outubro de 2013.] www.procelinfo.com.br.
- PROCEL Edifica.** [Online] [Citado em: 04 de Outubro de 2013.] <http://www.procelinfo.com.br/>.
- Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE.** Tabelas de Consumo/Eficiência energética. *INMETRO*. [Online] [Citado em: 20 de Agosto de 2013.] <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>.
- Roriz, Maurício. 2010.** Desempenho de chaminés solares para indução da ventilação natural em edificações submetidas a . São Carlos, SP, Brasil : FAPESP, 2010.
- Siqueira, Eduardo Maroco. 2011.** *Projeto do Envoltório de um Prédio com Energia Líquida Zero (PELZ)*. Porto Alegre : UFRGS, 2011.
- SOLAR XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building.* **Gonçalves, Helder, Rodrigues, Carlos e Aelenei, Laura. 2012.** s.l. : REHVA Journal, 2012.
- Thierry, Salomon, et al.** *Dimensionnement du puits climatique*.
- . *Dimensionnement du puits climatique*.
- Torres, Rafael Gerson. 2011.** *Projeto de um prédio de energia líquida zero (PELZ) com foco nos sistemas*. Porto Alegre : s.n., 2011.
- Trombe, A. e Bourret, B.** *Contrat Puits Provençal ADEME - FRME : experimentation de l'INSA*. p. 1993.
- U. S. Department of Energy. 2013.** Energy Efficiency and Renewable Energy. [Online] 2013. [Citado em: 29 de Outubro de 2013.] <http://zeb.buildinggreen.com/>.

U.S. DOE. Energy Efficiency & Renewable Energy. [Online] [Citado em: 26 de 06 de 2014.] <http://apps1.eere.energy.gov/>.

Uma visão sobre a Sistentabilidade Energética nas Cidades. **Fernandes, Eduardo de Oliveira. 2012.** Lisboa : s.n., 2012. Net Zero-Energy Buildings Conference.

University of Illinois. 2013. EnergyPlus - Input Output Reference. 2013.

—. **2010.** *Getting Started with EnergyPlus.* 2010.

US Department of Energy. 2013. *EnergyPlus Engineering Reference.* 2013.

2010. z2Building.com. [Online] 2010. [Citado em: 08 de Agosto de 2013.]

<http://www.z2building.com/NZEB.php>.

Zero Energy Design. [Online] [Citado em: 13 de Outubro de 2013.]

<http://www.zeroenergydesign.com/index.html>.

9 ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Dados e resultados de pesquisas sobre chaminés solares	I
Anexo II	Simulação Térmica Preliminar de Geometria Hipotética	III
Anexo III	Diretrizes para Iluminação Eficiente	IX
Anexo IV	Programa “Chaminé 1.0”	XIII
Anexo V	Plantas baixas apresentadas pela proposta arquitetônica	XIV
Anexo VI	Catálogo do painel fotovoltaico	XVII
Anexo VII	Arquivos digitais	XIX

9.1 ANEXO - Dados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares (Neves, 2012)

Pesquisa	Clima		Configuração geométrica							Metodologia			
	Latitude (°)	Localidade	Ambiente (m) (comp. x larg. x alt.)	Seção transversal da chaminé (m)	Comprimento chaminé (m)	Isolamento térmico (m)	Inclinação com a horizontal	Inércia térmica para ventilação noturna	Coefficiente de descarga (Cd)	Estudo experimental	Chaminé de referência	Modelo matemático	Simulação computacional (software)
Adam, Yamanaka e Kotani, 2002	Aquecimento elétrico		não tem	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	2	sim (não consta valor)	variável		0,8	x		x	
Afonso e Oliveira, 2000	41°08'N	Porto, Portugal	4 x 3 x 3	1 x 0,2	2	0 a 0,05	vertical	x		x	x	x	
Bansal, Mathur e Bhandari, 1993	26°53' N	Jaipur, Índia	4 x 4 x 4	1,5 x 0,15	1,5	sim (não consta valor)	variável		0,5 a 0,8			x	
Bansal et al, 2005	26°53' N	Jaipur, Índia	1 x 1 x 1	1 x 0,13	0,765	0,05	vertical		0,57	x		x	
Bassiouny e Korah (2009)	28°24'N	Minia, Egito	3 x 1 x 3	1 x 0,35	1		variável		0,57			x	
Bassiouny e Koura, 2008	28°24'N	Minia, Egito	1 x 1 x 1	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	1		vertical		0,57			x	
Chen et al, 2003	Aquecimento elétrico		7 x 5 x 3,9	0,62 x 0,2	1,5	0,1	variável			x		x	
Harris e Helwig, 2007	52°N	Edimburgo, Escócia		1 x 0,25	3	sim (não consta valor)	variável						Phoenix
Hirunlabh et al, 1999	13°45' N	Bangkok, Tailândia	3,45 x 3,35 x 2,68	1 x 0,145	2	0,029	vertical			x		x	
Khedari et al, 2000	13°45' N	Bangkok, Tailândia	3,45 x 3,35 x 2,68	1 x 0,14	1,5		25°			x			
Mathur, Anupma e Mathur, 2008	26°53' N	Jaipur, Índia	3 x 3 x 3	1 x 0,35	1	0,05	vertical 45°			x			
Mathur, Mathur e Anupma, 2006	26°53' N	Jaipur, Índia	1 x 1 x 1	1 x 0,35	1	0,05	variável		0,57	x		x	
Ong e Chow, 2003	3°05' N	Petaling Jaya, Malásia	1,02 x 0,48 x 2	0,45 x 0,3	1,875	0,05	vertical		0,57	x		x	
Sakonidou et al, 2008	41°07'N	Serres, Grécia		0,74 x 0,11	4	0,05	variável		0,57	x		x	Fluent

Resultados de pesquisas desenvolvidas sobre chaminés solares (Neves, 2012)

Pesquisa	Desempenho (melhores resultados obtidos)									
	Ângulo de inclinação (°)	Seção transversal da chaminé	Radiação solar incidente (W/m ²)	Temperatura do ar interno (°C)	Temperatura do ar externo (°C)	Vazão volumétrica (m ³ /h)	Vazão mássica (kg/h)	Velocidade do ar (m/s)	Taxa de renovação no ambiente (nº de renovações/h)	Temperatura da placa absorvedora (°C)
Adam, Yamanaka e Kotani, 2002	45°	1 x 0,3	500			273,6		0,25		
Afonso e Oliveira, 2000	90°	1 x 0,2	761	20,6	13	381,6	432	0,53	10,6	
Bansal, Mathur e Bhandari, 1993	30°	1,5 x 0,15	200 1000		36	140,4 331,2		0,17 0,41	2,2 5,2	
Bansal et al, 2005	90°	1 x 0,13	750			111,6		0,24		
Bassiouny e Korah (2009)	45°	1 x 0,35	750				237,6			86,9
Bassiouny e Koura, 2008	90°	1 x 0,1 1 x 0,2 1 x 0,3	700			82,8 194,4 302,4		0,23 0,27 0,28	3,5 5,1 6,0	75
Chen et al, 2003	45°	0,62 x 0,2	600			180		0,4	1,3	
Harris e Helwig, 2007	67,5°	1 x 0,25		32		396				
Hirunlabh et al, 1999	90°	1 x 0,145	385		32		54			75
Khedari et al, 2000	25°	1 x 0,14	500	39	34	90		0,18	2,9	
Mathur, Anupma e Mathur, 2008	90° 45°	1 x 0,35	949,5				262,8 273,6			
Mathur, Mathur e Anupma, 2006	45°	1 x 0,35	750	40		277,2		0,22		
Ong e Chow, 2003	90°	0,45 x 0,3	650			190,8		0,39		
Sakonidou et al, 2008	60°	0,74 x 0,11	831,6		28,9			0,68		86

9.2 ANEXO - Simulação Térmica Preliminar de Geometrias Hipotéticas

As três geometrias hipotéticas inicialmente propostas pela arquitetura foram simuladas no *EnergyPlus*.

Os passos para essa simulação preliminar simulação são abordados nos tópicos seguintes.

9.2.1 Modelagem da envoltória

A envoltória do edifício foi construída no *Google SketchUp* com o auxílio do plugin *OpenStudio* para transformar o desenho gráfico em linguagem do *EnergyPlus*. As três envoltórias são apresentadas abaixo, seguindo o mesmo padrão da Figura 10. Não se dividiu as geometrias em pavimentos porque o objetivo atual é apenas determinar qual das três apresenta um melhor desempenho térmico.

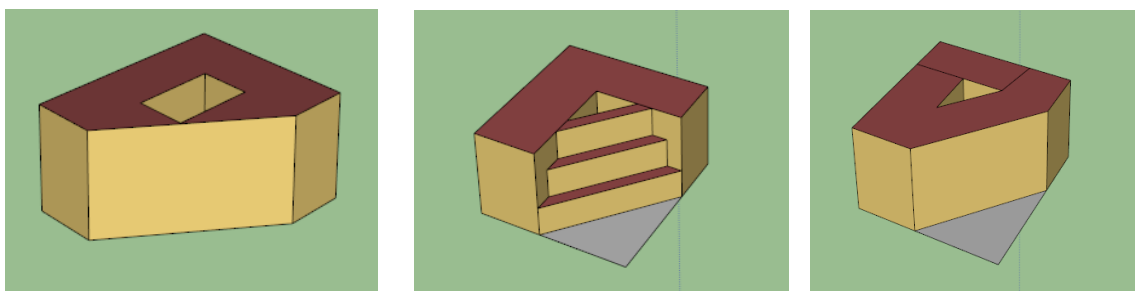


Figura 58: Envoltória modelada das geometrias A, B e C no *Google SketchUp*

9.2.2 Tipo de espaço, zonas térmicas e arquivo climático

Após a modelagem da envoltória, ainda no plugin *OpenStudio*, selecionou-se um tipo de espaço para que sejam adotados perfis padrões de utilização e características de construção. Definiu-se como o espaço típico para os três edifícios um Escritório Médio seguindo os padrões da ASHRAE 90.1-2004. Com a definição dos tipos dos espaços, foi configurada uma zona térmica para cada geometria.

A configuração do programa foi então ajustada da seguinte maneira para as três geometrias:

- Todas as cargas internas foram retiradas para permitir uma análise somente da envoltória do espaço.
- A programação do termostato foi definida para manter temperaturas internas abaixo de 20°C em todas as horas do ano.
- As características de construção foram mantidas conforme o *default*.

Configurou-se o programa para trabalhar com o arquivo climático de Brasília e realizou-se dois tipos de simulação:

1. Evolução livre: as formas foram avaliadas sem a presença de sistemas de climatização ativos;

2. *Ideal Air Loads*: método de análise do software que permite a avaliação das necessidades anuais de energia para a climatização do edifício, bem como o cálculo da carga térmica. Nesse método, não são inseridos os sistemas de climatização a serem utilizados. O programa calcula apenas as necessidades, sem analisar o funcionamento dos sistemas envolvidos.

9.2.3 Resultados

9.2.3.1 Evolução livre

A simulação em evolução livre permite uma avaliação gráfica do comportamento térmico do edifício sem a influência dos sistemas ativos de climatização. Os gráficos abaixo mostram a evolução da temperatura do ar ao longo do ano.

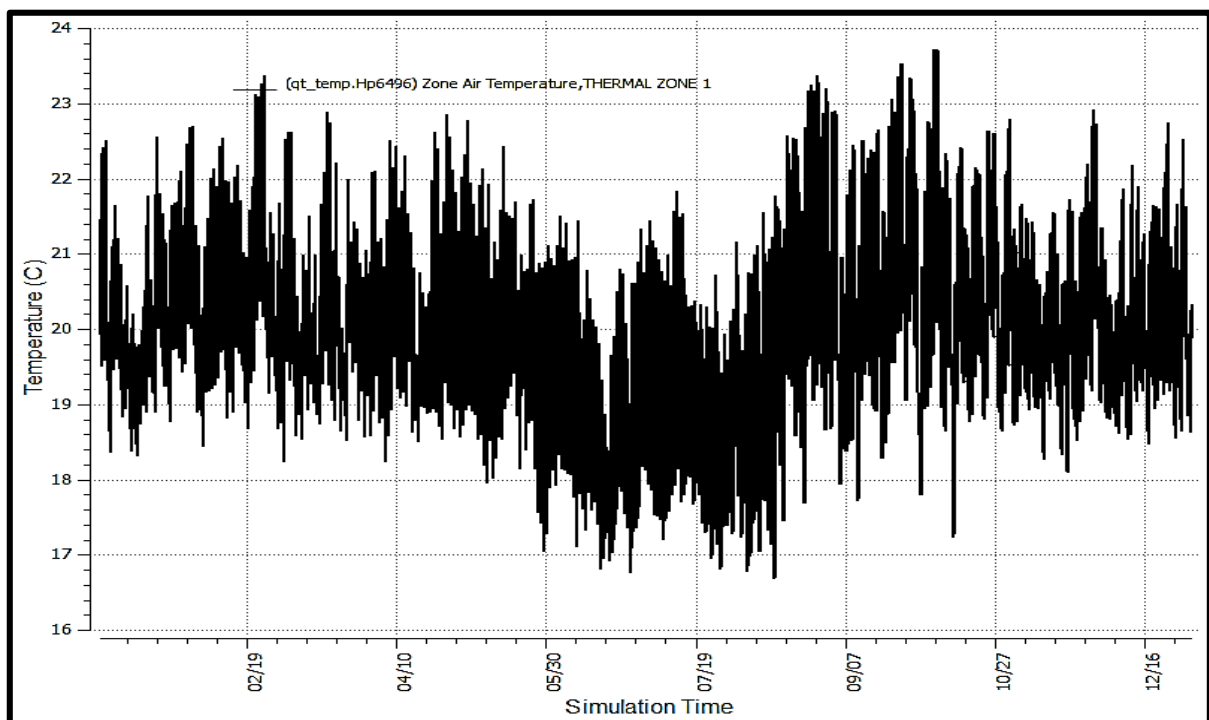


Figura 59: Temperatura do Ar para a Geometria A em evolução livre

Máxima de 23,7°C às 20 horas do dia 06 de outubro

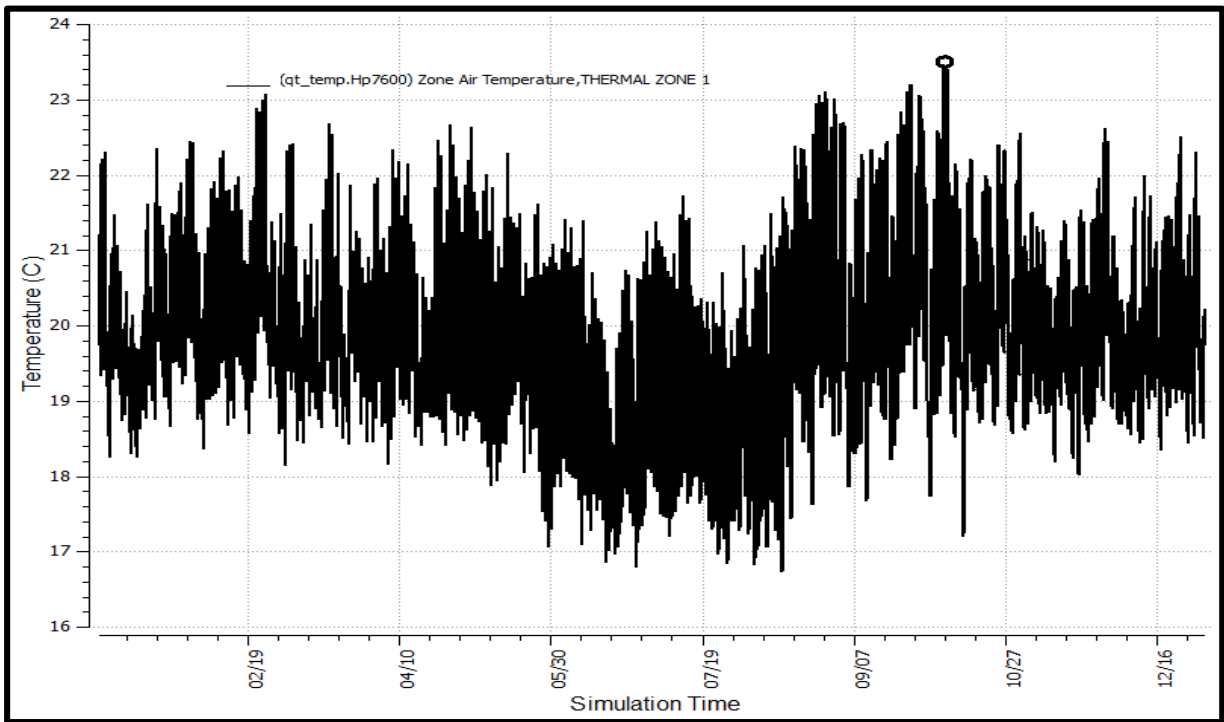


Figura 60: Temperatura do Ar para a Geometria B em evolução livre

Máxima de 23,5°C às 20 horas do dia 06 de outubro

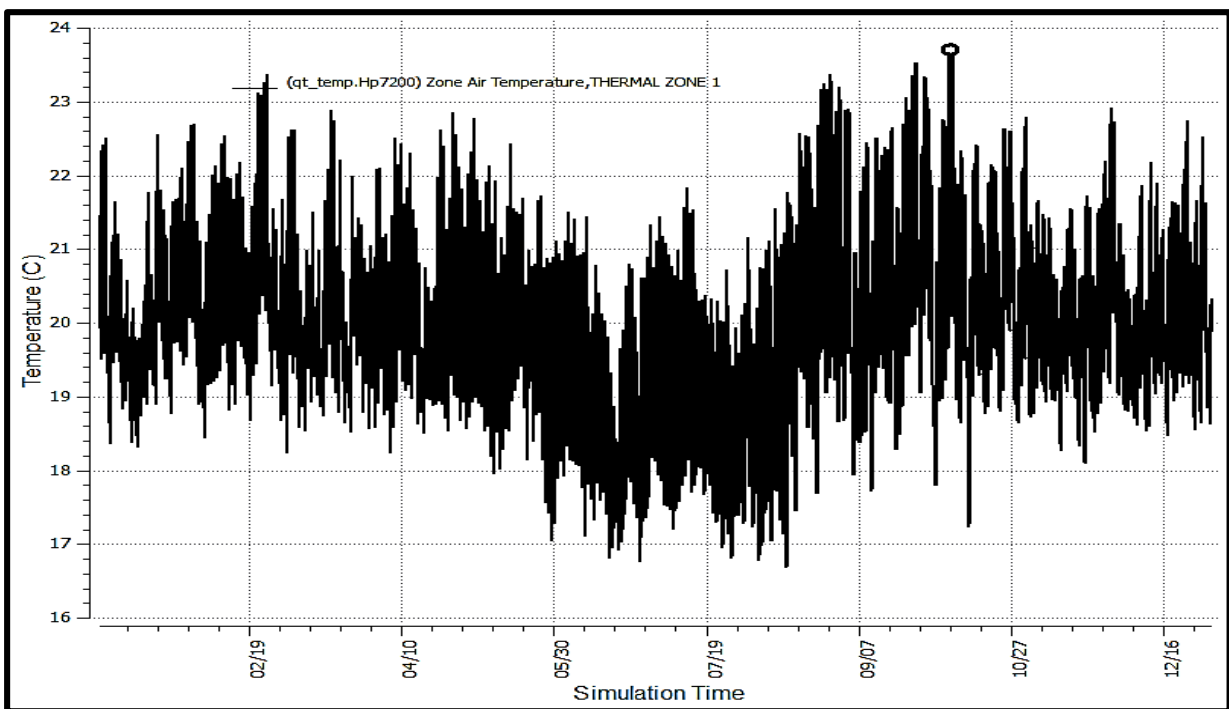


Figura 61: Temperatura do Ar para a Geometria C em evolução livre

Máxima de 23,7°C às 18 horas do dia 06 de outubro.

9.2.3.2 Ideal Air Loads

A simulação pelo método *Ideal Air Loads* permite a avaliação gráfica da carga térmica do edifício ao longo das horas do ano, conforme condensado nos gráficos seguintes.

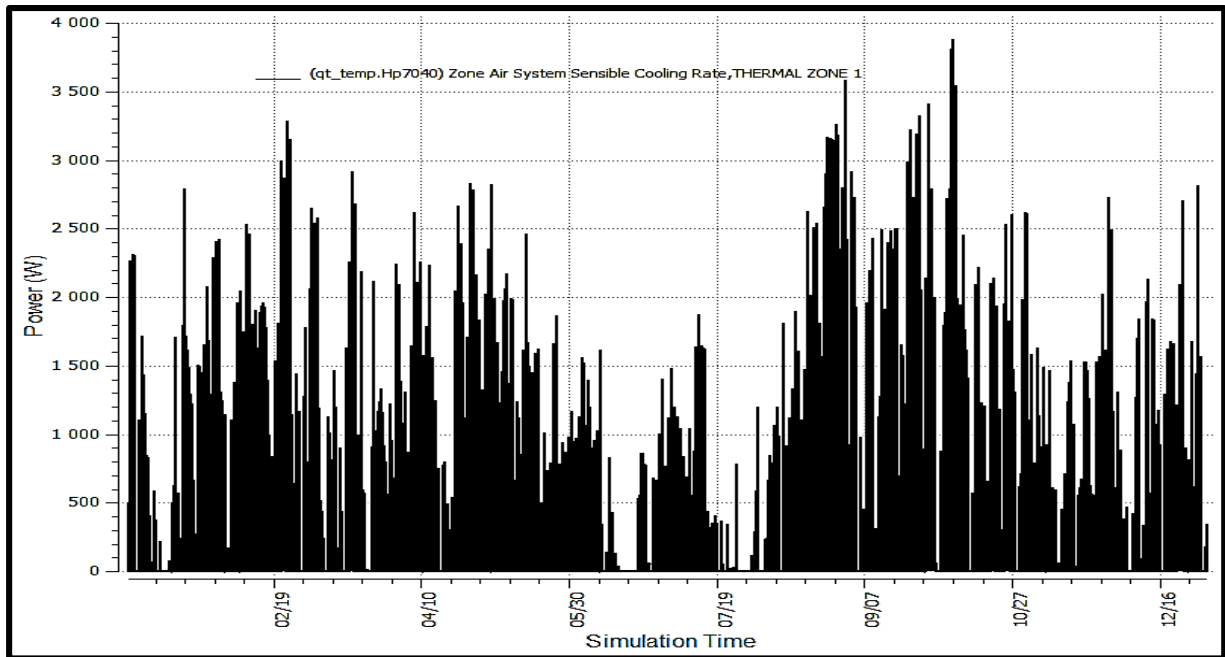


Figura 62: Carga sensível da geometria A ao longo de um ano

Máximas carga de 3881 W às 19 horas do dia 06 de outubro.

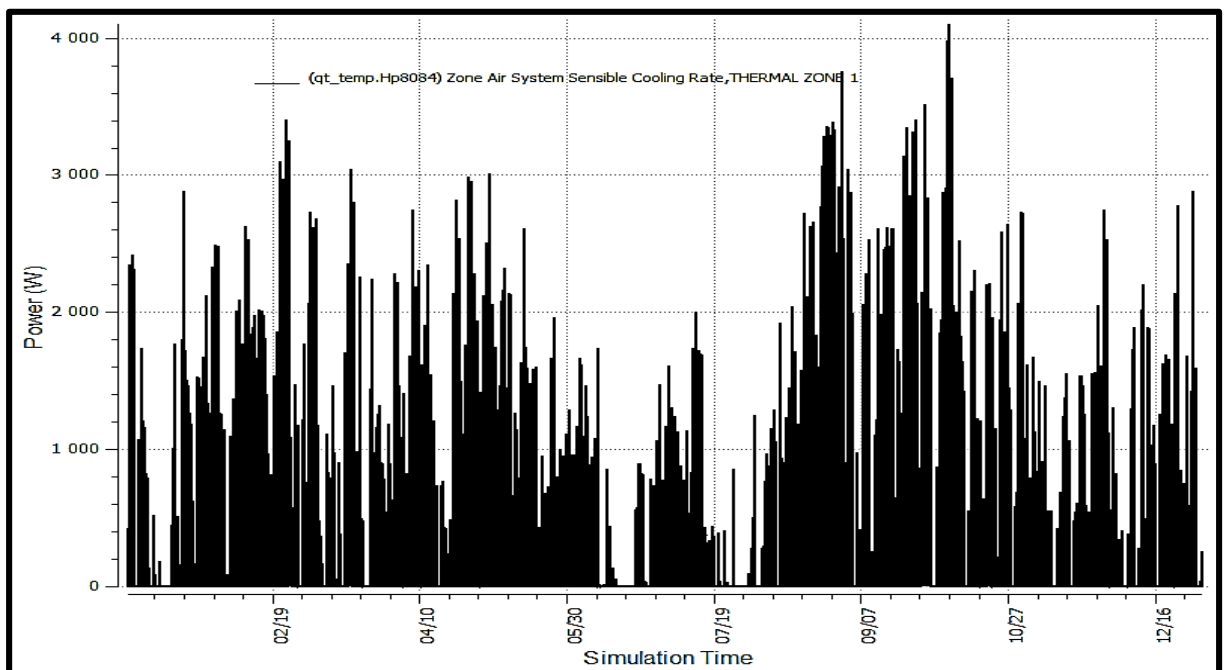


Figura 63: Carga sensível da geometria B ao longo de um ano

Carga máxima de 4101 W às 19 horas do dia 06 de outubro.

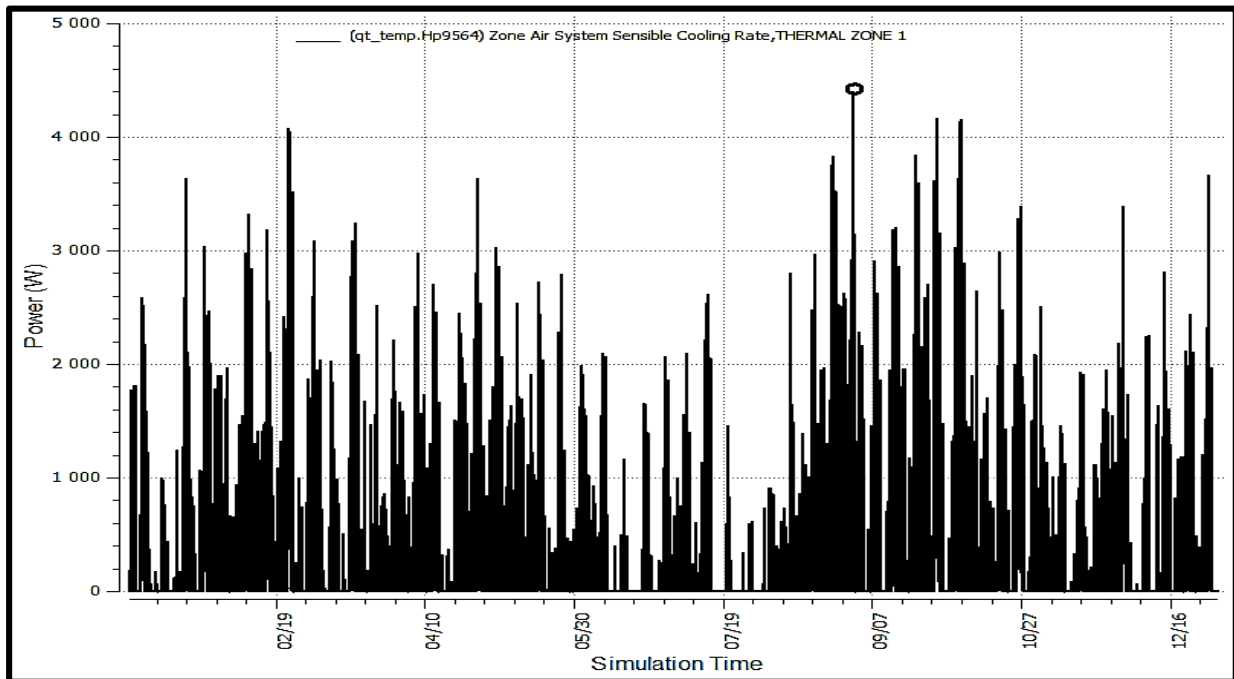


Figura 64: Carga sensível da geometria C ao longo de um ano

Carga máxima de 4431 W às 19 horas do dia 31 de agosto. Deve-se tomar cuidado na análise desse gráfico, porque a escala vertical do mesmo foi alterada em relação aos gráficos anteriores. Infelizmente o programa utilizado para a análise dos dados não permite o ajuste manual das escalas dos eixos.

Tabela 27: Comparação das temperaturas e cargas máximas para cada geometria e energia consumida em um ano

Geometria	Temperatura Máxima (°C)	Carga Térmica Máxima (W)	Energia consumida para arrefecimento (GJ/ano)
A	23,7	3881	16,76
B	23,5	4101	16,47
C	23,7	4431	17,25

9.2.4 Análise dos resultados

Os resultados obtidos pelas simulações das três geometrias convergiram para valores próximos de picos de temperatura e de carga térmica. Ao integrar a potência utilizada para o arrefecimento ao longo do ano, as simulações apontam para uma energia consumida cerca de 4% maior para a Geometria C do que para as geometrias A e B. A diferença também não pode ser entendida como conclusiva para a escolha da forma a ser utilizada.

Portanto, da análise dos resultados conclui-se que as três geometrias possuem comportamento térmicos muito próximos, com um pequeno aumento do consumo da geometria “C” em relação à “A” e “B”.

Será utilizada a geometria “B” e os seus resultados das simulações térmicas para realizar o dimensionamento e análise dos sistemas de climatização a serem adotados na edificação *nZEB*. O objetivo é juntar os estudos tratados nesse trabalho em uma situação hipotética para que, posteriormente, possa ser estendido a uma análise real.

9.3 ANEXO – Diretrizes para iluminação eficiente

As diretrizes básicas para uma iluminação eficiente e de baixo consumo são apresentadas com o objetivo de direcionar o projeto lumínico do edifício. As instruções foram elaboradas com o intuito de que o ambiente proporcione a visualização do ambiente e o desenvolvimento adequado das tarefas para as quais foi concebido, sem causar fadiga visual ou desconforto.

A redução dos gastos de energia elétrica com iluminação artificial durante o dia é um dos principais pontos a serem atacados quando se propõe uma construção energeticamente eficiente. Dado que, em dias com poucas nuvens, a luz solar está totalmente à disposição para iluminar os ambientes, deve-se proceder então com todos os mecanismos possíveis a fim de aproveitar ao máximo a iluminação natural nos ambientes.

A dificuldade da difusão da luz solar surge já na primeira etapa do projeto arquitetônico da edificação. Normalmente ocorre excesso de luminosidade nas proximidades das janelas e falta de iluminação suficiente nas regiões mais afastadas. O excesso de luminosidade é um problema porque resulta no ofuscamento dos ocupantes ali presentes.

Outro problema frequente na utilização da iluminação natural é o aumento da carga térmica do ambiente devido a dois fatores que ocorrem simultaneamente: 1) a luz solar, principalmente se incidir diretamente dentro do ambiente, passa também a transmitir radiações de diversos comprimentos de onda, aquecendo o local; 2) por possuir comumente uma pequena espessura, a envoltiva de material transparente passa a conduzir com mais facilidade o calor. Para evitar esse aumento de carga, deve-se proceder à adoção de medidas que não permitam a completa entrada da radiação solar e buscar a materiais com altas resistências térmicas para compor a fachada.

Com o objetivo de melhor distribuir a iluminação no ambiente e reduzir a transmissão de calor, diversas soluções tem sido empregadas e são brevemente apresentadas abaixo:

9.3.1 Prateleiras de luz na janelas

Conforme (Garrocho, 2005), uma das características mais marcantes da iluminação lateral é a sua desuniformidade na distribuição pelo local. Com o objetivo de aumentar a eficiência da iluminação lateral e evitar o efeito do ofuscamento, recorre-se frequentemente ao uso de prateleiras de luz, que é “um elemento de controle colocado horizontalmente num componente de passagem vertical, acima do nível de visão, definindo uma porção superior e inferior, protegendo o ambiente interno contra a radiação solar direta e redirecionando a luz natural para o teto” (ABNT, 2005).

9.3.2 Iluminação zenital

O termo iluminação zenital refere-se aos recursos de iluminação utilizados na parte superior da edificação como claraboias, domos ou cúpulas capazes de captar a luz natural quer do sol, quer da abóbada celeste. O uso da iluminação através de aberturas zenitais possibilita uma maior uniformidade

de distribuição da luz natural em relação à iluminação lateral e permite maiores níveis de iluminância sobre o plano de trabalho (Garrocho, 2005).



Figura 65: Iluminação zenital em restaurante Gero RJ (restaurante do grupo Fasano)

9.3.3 Iluminação artificial

Em muitos casos é necessário se recorrer à iluminação artificial devido à falta de luz solar, seja em decorrência da presença de nebulosidade, ou por conta do período noturno.

São muitos os tipos de iluminação artificial disponíveis atualmente. Os sistemas mais comuns são os baseados em lâmpadas incandescentes, fluorescentes ou diodos emissores de luz (LED). Dos três tipos de lâmpadas apresentados, os LEDs são os que possuem maior eficiência. É regra que, quando há um aumento na dissipação de calor, a eficiência luminosa diminui, fator que ocorre no caso das lâmpadas incandescentes em relação às outras soluções. Além da diminuição da eficiência luminosa, a dissipação de calor ainda gera um aumento na carga térmica do ambiente, resultando em um outro consumo energético se houver necessidade retirar artificialmente essa carga por meio de condicionamento do ar.

(Manual de Iluminação Eficiente, 2002)

Para se mensurar o nível de iluminação de um ambiente, utiliza-se duas possíveis unidades: o lúmen e o lux. O lúmen é utilizado para mensurar a intensidade do fluxo luminoso percebida a partir de uma fonte de luz sem considerar a distância ou área de medição em relação à fonte, ou seja, essa unidade analisa somente a quantidade de brilho de uma fonte, sem levar em conta o seu potencial de realmente iluminar um determinado ambiente. Para que se considere a distância ou área de medição em relação à

fonte utiliza-se o lux. Um lux é a iluminância medida em um metro quadrado por um fluxo luminoso de um lúmen. Para o cálculo da iluminância mantida em um ambiente por um determinado fluxo luminoso utiliza-se a seguinte relação:

$$E_v(\text{lux}) = \frac{\phi(\text{lúmens})}{A(\text{m}^2)} \quad (27)$$

Portanto, quando se analisa a capacidade de uma fonte para emitir radiação luminosa, a unidade que se apresenta é o lúmen, já para a avaliação do nível de iluminância de um ambiente, a unidade utilizada é o lux.

Os níveis de iluminância adequados para cada tipo de ambiente são diferentes diante das atividades que ali são desenvolvidas. A norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013, emitida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, especifica os níveis recomendados de iluminância para cada ambiente, juntamente com o limite de ofuscamento unificado e o índice de reprodução de cor mínimo..

Para a análise das diferentes fontes luminosas, necessário se faz considerar a eficiência luminosa de cada opção a ser adotada. A eficiência luminosa é uma medida da disponibilização de luz útil em relação à entrada de energia, tendo como unidade lumens por watt (lm/W). (Next Generation Lighting Industry Alliance with the U. S. Department of Energy, 2008) .

Além da eficiência luminosa, a vida útil é outro importante fator a ser avaliado para a análise da eficiência energética de um sistema de iluminação artificial, e devem, portanto merecer grande atenção na implantação de programas de conservação e uso eficiente de energia (Manual de Iluminação Eficiente, 2002).

O tipo de lâmpada mais simples e com menor custo de aquisição são as incandescentes. Essas dissipam grande parte da energia na forma de calor, obtendo uma baixa eficiência energética aproximada de apenas 20 lm/W e vida útil de no máximo 1000 horas. (Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE)

As lâmpadas fluorescentes são empregadas como solução de bom custo benefício por apresentarem consumo energético até 80% menor que as incandescentes e durabilidade aproximadamente 10 vezes maior. A eficiência luminosa das lâmpadas fluorescentes pode atingir valores de até 70 lm/W para lâmpadas fluorescente standard, e até 100 lm/W para lâmpadas fluorescentes trifósforo. (Manual de Iluminação Eficiente, 2002)

Além da tecnologia de lâmpadas fluorescentes, os diodos emissores de luz tem sofrido um grande desenvolvimento e se apresentam como ótima alternativa em ambientes que requerem nível moderado de iluminação. Um dos principais fabricantes de lâmpadas LED, a Cree, já disponibiliza em seu catálogo possibilidades de iluminação com eficiência de até 115 lm/W e vida útil de 75000 horas, com a possibilidade de utilização de dimmers. (Cree, 2013) O fator estético também se apresenta como um benefício da tecnologia LED porque torna-se possível a utilização de iluminação com variadas cores. O problema que se apresenta nesse caso é o custo de aquisição superior às demais tecnologias.

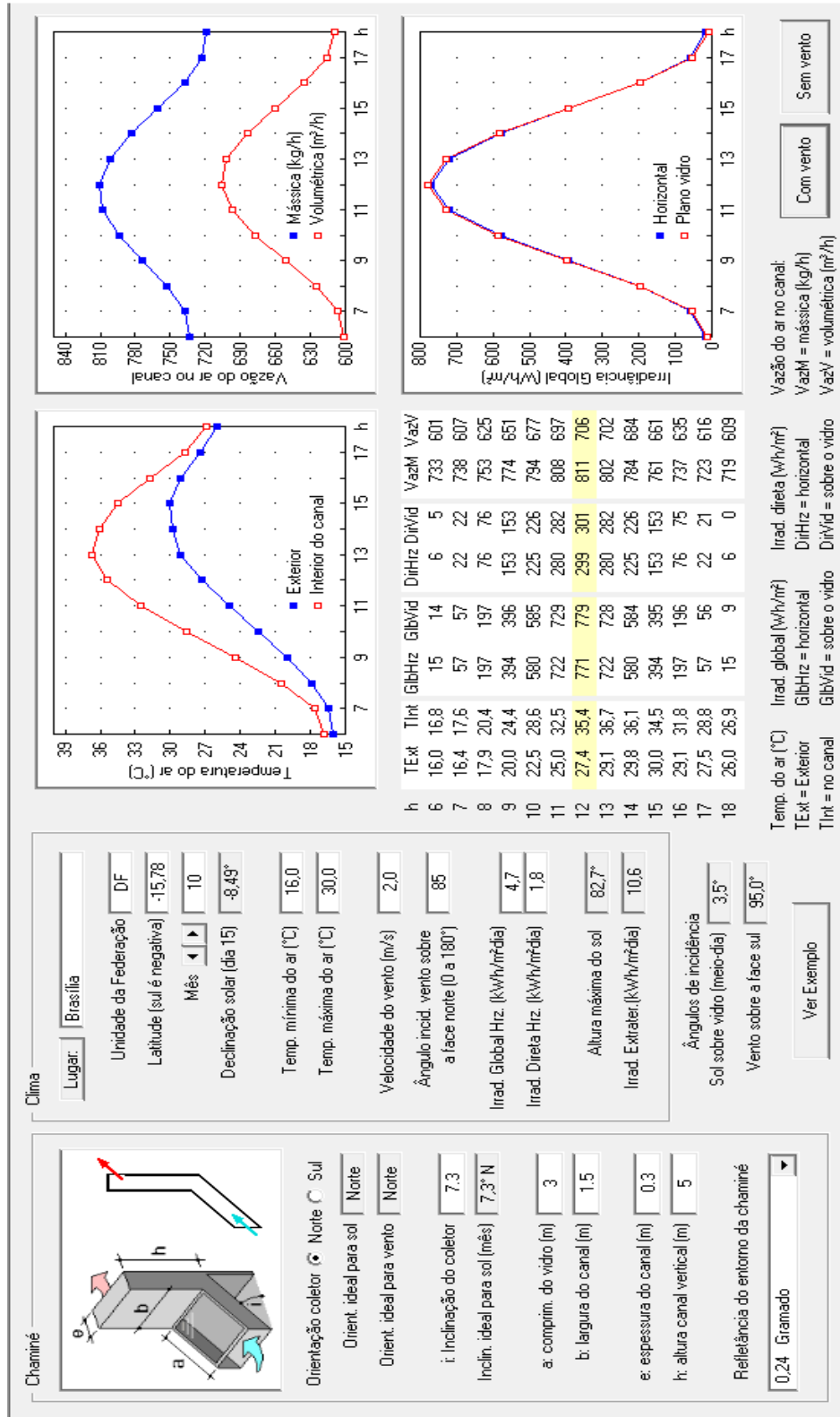
Portanto, na necessidade da utilização de iluminação artificial com a melhor eficiência possível, os LEDs têm se mostrado como a solução a ser priorizada.

De forma complementar, é comum adotar-se um sistema de dimerização da iluminação por controle fotoelétrico. Esse sistema permite um controle da energia fornecida à lâmpada, alterando a sua capacidade de iluminação e potência, resultando em redução do consumo de energia e adequação luminosa para diferentes circunstâncias. Dessa maneira, a iluminação artificial pode ser regulada conforme a intensidade de luz natural disponibilizada e de acordo com a necessidade do utilizador. Para o controle desse sistema, utilizam-se sensores de iluminação posicionados de forma estratégica para avaliar a disponibilidade de luz natural, e controladores manuais permitindo ao utilizador realizar os ajustes conforme a necessidade de uso momentânea.

Deve-se setorizar o sistema de acordo com a proximidade das fontes de luz externas para que as lâmpadas artificiais posicionadas mais distantes das janelas possam ser reguladas para potências menores do que as lâmpadas mais próximas das fontes naturais de luz. Caso haja necessidades diferenciadas de iluminação em diferentes posições do ambiente, deve-se prover setorização também para essas necessidades.

Com o aproveitamento máximo da luz natural e adotando as medidas para a iluminação artificial necessária, é possível se chegar ao nível mínimo de consumo energético.

9.4 ANEXO - Programa “Chaminé 1.0”



9.5 ANEXO – Plantas baixas apresentadas pela proposta arquitetônica



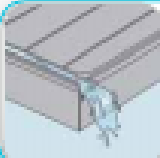




Panasonic

HIT® photovoltaic module

HIT-N245
HIT-N240





Water drainage frame

- Rain water is drained off the module surface.
- This avoids not only water accumulation, but also water stains after drying.
- Even in low-angle installations, water drainage corners keep the module clean.

Power from both sides

- HIT® cells generate solar electricity simultaneously on the front and on the back side.
- This additional amount of light is combined with the light taken up by the front side of the module.

Vertically integrated factory

- Efficient production flow improves product quality as entire process from wafer to cell is done at the same location.
- No risk of damage of individual components during transportation between factories.

19.4%*
194 W/m²



* For N245

HIT® cell technology

The HIT® solar cell is made of a thin monocrystalline silicon wafer surrounded by ultra-thin amorphous silicon layers. This product offers the industry's leading performance and value, using state-of-the-art manufacturing techniques. The development of the HIT® solar cell was supported in part by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

Quality

Panasonic is truly committed to quality since it began developing and manufacturing solar PV technology in 1975. Our long track record is supported by our claim-rate of only 0.0036% in our European factory in Dorog, Hungary (as of September 2013).

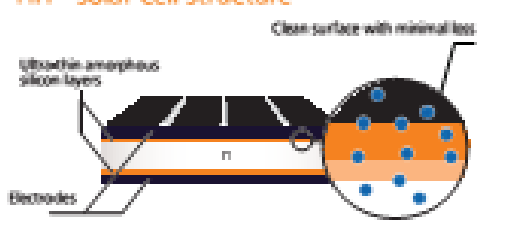
Special features

HIT® solar modules are 100% emission free, have no moving parts and produce no noise. The dimensions of the HIT® modules enable a space saving installation and the achievement of maximum output power possible on a given roof area.

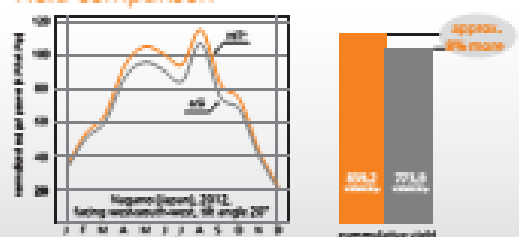
High performance at high temperatures

With its very low temperature coefficient of only -0.29%/°C, the HIT® solar cell can maintain a higher efficiency than a conventional crystalline silicon solar cell, even at high temperatures.

HIT® solar cell structure



Yield comparison



approx. 6% more

HIT®
Photovoltaic Module

*HIT® is a registered trademark of Panasonic Group.

Model	Cell efficiency	Module efficiency	Output/m ²
N245	22.0%	19.4%	194 W/m ²
N240	21.6%	19.0%	190 W/m ²

Electrical data (at STC)

	Verpackungsgröße	Verpackungsgröße
Max. power (Pmax) [W]	245	240
Max. power voltage (Vmp) [V]	44,3	43,6
Max. power current (Imp) [A]	5,54	5,51
Open circuit voltage (Voc) [V]	53,0	52,4
Short circuit current (Isc) [A]	5,85	5,85
Max. over current rating [A]	15	
Production tolerance power [%]	+10/-5*	
Max. system voltage [V]	1000	

* Refer: Standard Test Conditions: Air mass 1,5; Irradiance = 1000W/m²; cell temp. 25°C
* All modules measured by Panasonic facilities have an output with positive tolerance.

Temperature characteristics

Temperature (NOCT) [°C]	44,0	44,0
Temp. coefficient of Pmax [%/°C]	-0,29	-0,29
Temp. coefficient of Voc [mV/°C]	-0,133	-0,131
Temp. coefficient of Isc [mA/°C]	1,76	1,76

At NOCT (Normal Operating Conditions)

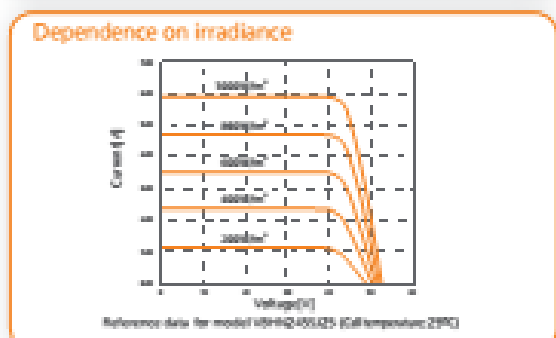
Max. power (Pmax) [W]	187,4	183,2
Max. power voltage (Vmp) [V]	42,5	41,7
Max. power current (Imp) [A]	4,41	4,39
Open circuit voltage (Voc) [V]	50,3	49,7
Short circuit current (Isc) [A]	4,71	4,71

* Refer: Nominal Operating Cell Temp. Air mass 1,5; Irradiance = 800W/m²; Air temperature 25°C; wind speed 1 m/s

At low irradiance (20%)

Max. power (Pmax) [W]	47,0	45,9
Max. power voltage (Vmp) [V]	43,2	42,2
Max. power current (Imp) [A]	1,09	1,09
Open circuit voltage (Voc) [V]	49,6	49,0
Short circuit current (Isc) [A]	1,17	1,17

* Refer: Low irradiance: Air mass 1,5; Irradiance = 200W/m²; cell temp. = 25°C



Dimensions and weight

weight: 15 kg
weight per unit area: 11,9 kg/m²

Guarantee

Power output: 10 years (90% of Pmin), 25 years (80% of Pmin)
Product workmanship: 10 years (based on guarantee document)

Materials

Cell material: 5 inch HIT cells
Glass material: AR coated tempered glass
Frame materials: Black anodized aluminium
Connectors type: SMK

Certificates

IEC61215
IEC61730-1
IEC61730-2

Please consult your local dealer for more information.

CAUTION! Please read the installation manual carefully before using the products.
Used electrical and electronic products must not be mixed with general household waste. For proper treatment, recovery and recycling of old products, please take them to applicable collection points in accordance with your national legislation.

Panasonic Eco Solutions Energy Management Europe
SANYO Component Europe GmbH
Stahlguberring 4
81829 Munich, Germany
Tel +49 (0)89 440095-0
Fax +49 (0)89 440095-170
<http://www.evsolutions.panasonic.eu>
info.ecs@eu.panasonic.com



All Rights Reserved © 2014 COPYRIGHT SANYO Component Europe GmbH
Specifications are subject to change without notice. 01/2014

9.7 ANEXO – Arquivos digitais

Em complemento ao trabalho exposto, um banco de informações digitais é disponibilizado em um CD que faz parte integrante desse estudo. Os arquivos visam permitir uma análise mais criteriosa e a continuação do trabalho por outras equipes, sem que seja necessário se iniciar do zero todo o processo de simulação.

No CD, constam as seguintes pastas e arquivos:

- 0 – Relatório de Projeto de Graduação
 - Relatório de Projeto de Graduação
- 1 – Arquivos de Simulação:
 - Arquivo de Simulacao exportado para EnergyPlus.idf
 - Arquivo de Simulação *OpenStudio*.osm
 - Complementos *EnergyPlus* – Ventilacao Natural e ChamineTermica.idf
 - Simulacao de Producao de Energia no SAM.zsam
 - Dimensionamento Simplificado de Poço Provençal.xlsx
- 2 – Resultados de Simulação
 - Resultados Simualação Final EnergyPlus.sql
 - Resultados Simualação Final EnergyPlus2.csv
 - Resultados Simualação Final EnergyPlus3.csv
- 3 – Relatórios de Simulação
 - Relatório *EnergyPlus* – Versão Final.pdf
 - Relatório *OpenStudio* – Versão Final.pdf
- 4 – Catálogos – Luminária e Painel Fotovoltaico
 - Cree – Luminárias LED.pdf
 - Panasonic – Painel Fotovoltaico.pdf