



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UM EDIFÍCIO DE CARÁTER
EXPERIMENTAL SEGUNDO O CONCEITO
NZEB PARA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Por,
Hugo de Paula Franco Teixeira

Brasília, 26 de Junho de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UM EDIFÍCIO DE CARÁTER
EXPERIMENTAL SEGUNDO O CONCEITO
NZEB PARA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

POR,

Hugo de Paula Franco Teixeira Matrícula: 10/0030866

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. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, UnB/ENM

Brasília, 26 de Junho de 2015

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais que ao longo da vida se empenharam de forma incondicional para garantir minha educação.

Hugo de Paula Franco Teixeira

RESUMO

O presente trabalho apresenta a atualização da proposta de uma edificação experimental com balanço energético nulo (net Zero Energy Building – nZEB) realizada por Pinto(2014).Assim, visando alcançar o balanço energético nulo, o edifício deverá ter um consumo de energia inferior ou igual à energia gerada no edifício ao longo do período de um ano.

O edifício se prestará a abrigar diversos tipos de atividade, mas principalmente será um ambiente utilizado para o desenvolvimento de tecnologias energeticamente sustentáveis e envolverá diferentes áreas do conhecimento no processo de sua concepção.

O balanço energético foi avaliado por meio do uso da ferramenta de simulação energética. Em primeiro lugar buscou-se atualizar a arquitetura utilizada como base no trabalho de Pinto (2014). Em seguida avaliou-se o conforto térmico do edifício em evolução livre para se verificar a necessidade de climatização.

O passo seguinte à análise em evolução livre do edifício foi cálculo da carga térmica do mesmo. Baseado nesse cálculo, diferentes soluções de climatização ativa foram analisadas e seus resultados avaliados. Tal análise foi respaldada em dois principais quesitos: nível de conforto térmico e a eficiência energética gerada individualmente por cada solução estudada. Os resultados das análises de várias soluções foram compilados e uma solução híbrida de climatização para o nZEB foi proposta.

O potencial de geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos biarticulado foi analisado via processo de simulação energética. Sendo assim, de posse dos resultados das etapas anteriores, foi possível verificar a viabilidade do balanço energético nulo (nZEB) para a proposta.

O consumo anual de energia elétrica para o modelo nZEB atualizado foi de 162,85MWh/ano. O software utilizado para o cálculo da energia elétrica produzida foi o *System Advisor Model*. Os resultados dessa análise apontaram para um total de 206,00 MWh/ano de energia elétrica gerada. Como consequência desses resultados o balanço energético nulo foi atingido.

ABSTRACT

The current work presents an updating of the proposal net zero energy building (nZEB) to be building at the University of Brasilia presented in the Pinto (2014) work. Thus, aiming to achieve the null balance of energy, the building must be able to produce a bigger or equal amount of the consumed energy.

The building is rendered to house various types of activity, but mainly will be a room used for the development of sustainable energy technologies and it will involve different areas of knowledge in the process its conception.

The energy balance was assessed through the use of energy simulation tool. The first step of develop the project aimed to update the architecture used as a base of the Work presented by Pinto (2014). Second, the thermal comfort was evaluated considering free evolution regime in order to verify the need of the use of air conditioning, followed by the calculation of the thermal load of the building. Based in the value of the thermal load, it was proposed some of HVAC systems and the results was analyzed and based on these results a hybrid solution was developed.

In the last part of the work, It was simulated the potential for electricity generation by using photovoltaic panels bi-articulated. Having the annual energy consumption, also gotten by energetic simulation, it is possible to check the possibility of having the null energy balance.

The annual consumption of electric energy for the updated nZEB model was of 162,85MWh/year. The software used to evaluate the produced energy was *System Advisor Model*. According to this software the electric energy produced was 206,00 MWh/ano. As a consequence of those results, the null energetic balance was achieved.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Tema em estudo e sua relevância	1
1.2 Revisão bibliográfica	5
1.3 Objetivos	11
1.4 Metodologia	11
1.5 Estrutura do trabalho.....	12
2 CONCEITO NZEB E SEU ESTÁGIO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO	14
2.1 Aspectos gerais	14
2.2 Projetos <i>nZEB</i>	15
3 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA	18
3.1 Conceito.....	18
3.2 Softwares.....	19
3.2.1 <i>EnergyPlus</i>	19
3.2.2 <i>Skecthup</i>	20
3.2.3 <i>Openstudio</i>	21
4 A PROPOSTA DE EDIFICAÇÃO NZEB PARA UnB	23
4.1 Proposta arquitetônica inicial	23
4.2 A proposta arquitetônica atualizada.....	25
5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	27
5.1 O modelo termoenergético.....	27
5.2 Características da envoltória.....	27
5.2.1 Paredes	28
5.2.2 Lajes e coberturas	28
5.2.3 Janelas	29
5.3 Clima e o arquivo climático	29
5.4 Tipos de espaços e cargas internas	30
5.5 Cronogramas	31
6 ANÁLISE PRELIMINAR.....	33
6.1 Metodologia	33
6.2 Resultados em evolução livre	33
6.3 Simulação da carga térmica.....	40
6.3.1 Zoneamento térmico.....	40

6.3.2	Carga térmica	41
6.3.3	Resultados	41
7	SOLUÇÕES ATIVAS DE CLIMATIZAÇÃO	43
7.1	Objetivo	43
7.2	Ventilação forçada	44
7.2.1	Simulação	45
7.2.2	Resultados	46
7.3	Resfriamento evaporativo	53
7.3.1	Simulação	54
7.3.2	Resultados	54
7.4	Sistema de climatização por expansão indireta	62
7.4.1	<i>Chiller</i> com condensação a ar	62
7.4.2	Resultados de otimização do sistema - VAV	81
7.4.3	<i>Chiller</i> com condensação água	82
7.5	Sistema de Climatização por Expansão Direta	86
7.5.1	Sistema de Climatização com <i>Variable Refrigerant Flow</i> (VRF)	86
7.6	Simulação	87
7.6.1	Resultados	88
7.7	Sistema Híbrido	89
7.7.1	Considerações	89
7.7.2	Resultados	89
7.7.3	Impacto ambiental	92
8	SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E O BALANÇO	
	ENERGÉTICO	93
8.1	Metodologia	93
8.2	Resultados	94
8.3	Balanço Energético	95
9	CONCLUSÃO	96
	BIBLIOGRAFIA	97
	ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia geral (PROCELINFO, 2009).....	2
Figura 1.2 - Composição da matriz energética brasileira (EPE, 2013).	3
Figura 1.3 - Proposta de modelo tridimensional de edifício nZEB (Brick, 2014).....	4
Figura 1.4 - Modelo térmico utilizado nas simulações energéticas (Pinto, 2014).....	5
Figura 2.1 - Edifício Blaue Heimet, Alemanha (Herkel e Kagerer, 2011).....	15
Figura 2.2 - Edifício Solar XXI, Portugal. (Golçalves, 2006).....	16
Figura 2.3 - Modelo 3D do projeto CECAS (USP Digital, 2010).....	16
Figura 3.1 - Etapas do processo de simulação termo-energética.....	18
Figura 3.2 - Interface do programa Energyplus.....	20
Figura 3.3 - Inteface do <i>software Sketup Make</i>	21
Figura 3.4 - Interface do <i>software Openstudio</i>	22
Figura 4.1 - Localização do terreno para construção do Edifício nZEB. (Pinto, 2014)	23
Figura 4.2 - Plano de necessidades desenvolvido pela FAU. (Pinto, 2014).....	24
Figura 4.3 - Modelo tridimensional proposto inicialmente pela equipe de arquitetura (Birck, 2014) ..	24
Figura 4.4 - Modelo tridimensional proposto pela FAU, atualizado. (Birck, 2014)	25
Figura 5.1 - Modelo termoenergético atualizado.	27
Figura 6.1 - Índice de PMV para o auditório localizado no Bloco Público.	34
Figura 6.2 -Índice de PMV para a Sala Multiuso localizado no Bloco Público.....	35
Figura 6.3 - Índice de PMV para Sala de Administração localizada no Bloco Escritórios.....	36
Figura 6.4 - Índice de PMV para Sala de Professor/Coordenador localizada no Bloco Escritórios. ...	37
Figura 6.5 - Índice de PMV do Laboratório localizada no Bloco de Laboratórios.	38
Figura 6.6 - Índice de PMV do Laboratório localizada no Bloco de Laboratórios.	39
Figura 6.7 - Superfícies de sombreamento utilizadas no nZEB.	40
Figura 6.8 - Região sombreada por uma superfície opaca.	40
Figura 6.9 - Zoneamento térmico do edifício nZEB.	41
Figura 7.1 - Funcionamento esquemático de um sistema com ventilação mecânica.	44
Figura 7.2- Modelagem da planta de ar para o sistema de ventilação forçada.....	45
Figura 7.3 - Consumo energético do edifício nZEB utilizado ventilação forçada.	46
Figura 7.4 - Consumo energético por componente.	46
Figura 7.5 - Perfil de PMV do Auditório Localizado no Bloco Público.	47
Figura 7.6 - Perfil de PMV do Auditório Localizado no Bloco Público.	48
Figura 7.7 - Índice de PMV para Sala de Administração localizada no Bloco Escritórios.....	49
Figura 7.8 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios.....	50
Figura 7.9 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.	51
Figura 7.10 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.	52

Figura 7.11 - Esquema do funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo.	53
Figura 7.12 - Modelagem do Sistema de Resfriamento Evaporativo.	54
Figura 7.13 - Consumo energético anual do edifício nZEB.	55
Figura 7.14 - Consumo energético por componente.	55
Figura 7.15 - Perfil de PMV para um dia típico de projeto para o Auditório localizado no Bloco Público.	56
Figura 7.16 - Perfil de PMV para a Sala de multiuso do Bloco Público.	57
Figura 7.17 - Perfil de PMV da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios.	58
Figura 7.18 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios... ..	59
Figura 7.19 - Perfil de PMV do Laboratório localizado 1º Pavimento do Bloco de Laboratórios.	60
Figura 7.20 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.	61
Figura 7.21 - Planta de água gelada do sistema de climatização por expansão indireta.	62
Figura 7.22 - Modelagem do circuito primário de água.	67
Figura 7.23 - Modelagem do circuito secundário água	67
Figura 7.24 - Modelagem da planta de ar.	67
Figura 7.25 - Esquema apresentando o sistema de renovação de ar.	68
Figura 7.26 - Processo de tratamento do ar representado na carta psicométrica.	69
Figura 7.27 - Consumo energético anual do edifício nZEB.	71
Figura 7.28 - Consumo energético por componente.	71
Figura 7.29- Evolução de demanda de carga e COP dos <i>chillers</i> para um dia típico de projeto.	72
Figura 7.30 - Perfil de PMV para um dia típico de projeto para o Auditório localizado no Bloco Público.	73
Figura 7.31 - Perfil de PMV para a Sala de multiuso do Bloco Público.	74
Figura 7.32 - Perfil de PMV da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios.	75
Figura 7.33 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios... ..	76
Figura 7.34 - Perfil de PMV do Laboratório localizado 1º Pavimento do Bloco de Laboratórios.	77
Figura 7.35 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.	78
Figura 7.36 - Consumo energético considerando o sistema HVAC com e sem <i>free cooling</i>	79
Figura 7.37 - Consumo por componente considerando o sistema otimizado.	79
Figura 7.38 - Perfil de demanda de carga na planta primária com e sem otimização	80
Figura 7.39 - Potência consumida pela bomba do circuito primário com e sem otimização.	80
Figura 7.40 - Consumo mensal do edifício para o casos com e sem a otimização.	81
Figura 7.41 - Consumo do componente ventilador para os dois caso de análise.	82
Figura 7.42 - Esquema de funcionamento e os componentes de uma torre de resfriamento.	82
Figura 7.43 - Modelagem da planta de condensação.	84
Figura 7.44 - Comparativo de consumo energético do edifício considerando o uso de <i>chiller</i> com condensação a ar e com condensação a água.	85

Figura 7.45 - Consumo por componente.	85
Figura 7.46 - Consumo do componente bomba para os dois sistemas de analisados.....	86
Figura 7.47 - Modelagem do sistema VRF.	88
Figura 7.48 - Consumo energético mensal considerando o sistema VRF.	88
Figura 7.49 - Consumo por componente do edifício nZEB.	89
Figura 7.50 - Consumo mensal total para do edifício nZEB.	90
Figura 7.51 - Consumo mensal por componente.....	91
Figura 7.52 - Consumo relativo de cada componente.	91
Figura 8.1 - Dados técnicos do painel fotovoltaico utilizado por Pinto (2014).....	93
Figura 8.2 - Interface do SAM para entrada de dados.....	94
Figura 8.3 - Balanço de energia do edifício nZEB.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Relação dos ambientes contemplados pela proposta atualizada.....	26
Tabela 5.1 - Propriedades dos materiais construtivos das paredes externas do edifício.	28
Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais construtivos das paredes internas do edifício.	28
Tabela 5.3 - Propriedades dos materiais construtivos das lajes internas do edifício.	29
Tabela 5.4 - Propriedades dos materiais construtivos das lajes de cobertura dos Blocos de Escritórios e Bloco Público.	29
Tabela 5.5 - Parâmetros de cargas internas adotados por tipo de espaço.	31
Tabela 5.6 - Cronograma de uso do edifício.	31
Tabela 6.1 - resultado de carga térmica por blocos.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7.1 - Consumo de energia por área de diversos edifícios. (Pinto, 2014)	43
Tabela 7.2 - Componentes utilizados no sistema de ventilação forçada.	45
Tabela 7.3 - Elementos utilizados na modelagem do sistema de resfriamento evaporativo do ar.	54
Tabela 7.4 - Configurações de referência do Chiller com condensação a ar.....	63
Tabela 7.5 - Componentes utilizados na modelagem do sistema de água gelada.	66
Tabela 7.6 - Componentes adicionados a planta de ar com sistema VAV.	70
Tabela 7.7 - Componentes utilizados na planta de condensação.....	84
Tabela 7.8 - Dados técnicos do chiller com condensação a água utilizado no modelo.	84
Tabela 7.9 - Parâmetros considerados para simulação da planta de condensação.	84
Tabela 7.10 - Componentes utilizado na modelagem do sistema VRF.....	87
Tabela 7.11 –Consumo de energia por área de diversos edifícios.....	90

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo se presta a apresentar o tema foco deste trabalho: a concepção de um edifício experimental segundo o conceito nZEB, contextualizando o mesmo, bem como apresentara relevância do tema.

1.1 Tema em estudo e sua relevância

A sociedade do século XXI vive um momento de intensa atividade. Projetar o futuro se tornou perigoso. A herança deixada pelas revoluções industriais dos séculos passados foi mais do que bem administrada: cada vez mais, resíduos são produzidos, gases são emitidos para a atmosfera, e o uso de recursos naturais parece não ter fim. O ano de 1972, na conferência de Estocolmo, realizada na Suécia, marca o início de uma discussão formal sobre o tema eficiência energética, na medida em que a comunidade ali reunida abre os olhos da sociedade para questões relacionadas às fontes de energia, de forma mais significativa para os combustíveis fósseis, a principal fonte utilizada à época. O produto final dessa conferência foi um documento intitulado: “Os limites do crescimento”.

Embasados nas diretrizes estabelecidas na conferência de Estocolmo, os Estados Unidos da América foi uma das primeiras nações a propor normas legais que gerenciassem o uso correto e prudente dos recursos energéticos. Neste país, já em 1975, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)* foi responsável por criar a *Standard 90 – Energy Conservation in New Design*. Três anos mais tarde, o estado da Califórnia instituiu a *Title 24*, basicamente, um programa de eficiência energética voltada para edifícios.

No Brasil, uma mobilização mais concreta se deu no ano de 1985; em um período conturbado da política brasileira, foi lançado pelo Ministério de Minas e Energia e de Indústria e Comércio, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Em linhas gerais, esse programa visa promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, eliminado dessa forma desperdícios (Eletrobras, 2014).

Ao longo de 22 anos, o PROCEL promoveu uma economia total de 28,5 milhões de MWh, o que equivale ao consumo de 16,3 milhões de residências, ou também à energia gerada por uma hidrelétrica de capacidade instalada de 6.841MW, a qual por sua vez teria um custo aproximado de R\$ 19,9 bilhões segundo dados da Eletrobrás (Eletrobras, 2014).

Fruto do programa PROCEL em parceria com o Inmetro, foi lançado no Brasil em 2009, a primeira Etiqueta de Eficiência Energética em Edificações, como mostra a Figura 1.1 abaixo. No caso de edifícios públicos, comerciais e de serviço são avaliados de modo geral três aspectos: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. O edifício pode ser etiquetado parcialmente, desde que sempre se contemple a avaliação da envoltória. No caso de edifícios residenciais são avaliados os seguintes itens: a envoltória e o sistema de aquecimento de água, além dos sistemas presentes nas áreas comuns dos

edifícios multifamiliares, como iluminação, elevadores, bombas centrífugas, entre outros. Detalhes adicionais serão fornecidos na seção 2.1 deste trabalho.



Figura 1.1 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia geral (PROCELINFO, 2009)

De uma forma geral, todas as estratégias que visem contemplar aspectos de eficiência energética em uma edificação devem ser pesadas no estágio de projeto. Nesta etapa devem-se buscar soluções que proporcionem aos usuários conforto com baixo uso de energia. Fazer o que se denomina *retrofit*, ou seja, modificações ou até mesmo implementar soluções em um projeto já efetivado implica em prejuízos não só para quem deseja fazê-lo, mas para o país como um todo, visto que isso implicará em gastos e consumo de recursos naturais.

Imersos nessa atmosfera de consumo e geração de resíduos, é crescente no mundo moderno os debates sobre o tema sustentabilidade. A razão para isto é que a atividade humana cada vez mais consome energia, e na maioria dos casos esse consumo não só leva a um esgotamento de recursos energéticos, como também agride o meio ambiente, colocando em voga a disponibilidade de recursos para as gerações futuras. Conceitos como o de reciclagem energética, energias renováveis estão fazendo cada dia mais parte do cotidiano moderno não só da população mundial de um modo geral, mais principalmente da comunidade científica, a qual se preocupa cada dia mais com estudo e a proposição de soluções que visem sanar ou atenuar certos problemas que este tema trás.

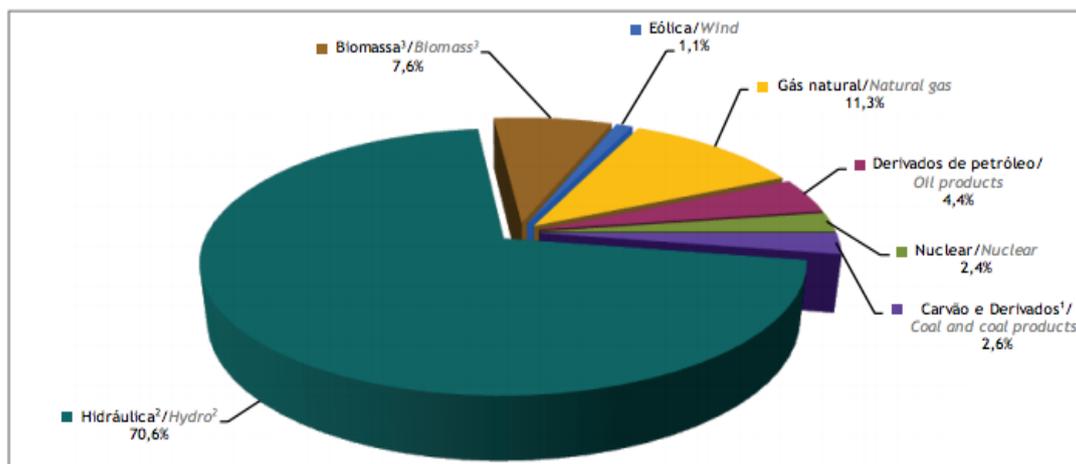


Figura 1.2 - Composição da matriz energética brasileira (EPE, 2013).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica a situação do Brasil em novembro de 2009 era: 2120 usinas geradoras em operação, as quais possuem uma capacidade instalada de 105.523 MW. Desse total, 162 são usinas hidrelétricas, 1268 térmicas, 352 Pequenas Centrais Hidrelétricas, duas nucleares, 300 Centrais Geradoras Hidrelétricas, 35 eólicas e uma solar. (ANEEL, 2009).

Essa dependência é algo preocupante, na medida em que uma simples estiagem de chuva é suficiente para causar um caos num país de dimensões continentais como o Brasil. A população brasileira já teve uma mostra do que pode vir a ser uma crise energética. Em um período que se estendeu de 2001 a 2002, o fornecimento de energia elétrica foi afetado, basicamente por falta de chuvas, aliado a um crescimento da indústria e do fornecimento de energia elétrica em residências e edifícios comerciais. A busca por soluções alternativas que visam uma eliminação, ou pelo menos uma diminuição dessa dependência são necessárias. Não bastando isso, a construção de hidroelétricas gera muito impacto ambiental. Além disso, outro fator importantíssimo no quesito de eficiência energética são as perdas que se tem na transmissão desde sua geração, até o ponto onde ela será efetivamente utilizada.

A sociedade moderna possui uma gama de atividades bem complexas e o mercado de um modo geral vem atendendo as necessidades dessa realidade. Entretanto, o preço a ser pago por isso é um consumo excessivo de energia. Viver hoje sem tal recurso é praticamente inviável. O que se pergunta então é como fazer isso de forma racional, ou seja, como ao mesmo tempo gerar energia atendendo aos apelos que a sustentabilidade impõe como visto acima, e como, além disso, atender as necessidades do ser humano. Inúmeras são as alternativas para se alcançar tais objetivos. O que se deve ter em mente, no entanto, é que algumas delas são absolutamente mais viáveis do que outras. Partindo desse potencial cabe, neste ponto; principalmente a comunidade científica propor métodos e modelos a serem adotados em futuro bem próximo.

A discussão acima levantada não é recente. Para se ter ideia, como citado acima, a ONU organizou em 1972 um conferência onde buscou-se definir as relações entre o ser humano e o meio ambiente. Não o bastante, ainda foi realizado 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). Em todas essas conferências o assunto energia fazia parte da pauta de discussão. Importantes avanços como relatórios e protocolos foram produzidos a partir dessas reuniões. São exemplos o Relatório de Brundtland, o Protocolo de Montreal, o Protocolo de Kyoto, e a Agenda 21. Em tese, esses acordos buscam gerir diversas questões relacionadas a esta interface homem/natureza além de levantar assuntos como à importância de ações que se proponham a gerar um aumento de eficiência energética, seja por um uso mais prudente desses recursos, seja pelo estudo e emprego de tecnologias que auxiliem alcançar tal objetivo.

Inserido neste contexto, assuntos como melhoramento de estruturas arquitetônicas visando redução de consumo energético, por meio da adoção de soluções passivas, simulação energética de edifícios, desenvolvimento de tecnologias energeticamente mais econômicas ganharam e continua ganhado cada vez mais notabilidade. Assim, o presente trabalho representa uma continuação do trabalho desenvolvido e defendido pelo aluno Geraldo Souza Pithon Pinto (Pinto, 2014), Universidade de Brasília, segundo o título de: ‘Proposta de edificação experimental com balanço energético nulo para a Universidade de Brasília’.

Em linhas gerais, o trabalho supracitado visa obter como produto final uma edificação de caráter experimental segundo o conceito de *net Zero Energy Building (nZEB)* ou seja, uma edificação que ao fim de um ano seja capaz de gerar um balanço energético nulo.

Em seu trabalho, Pinto (2014) apresentou uma proposta de um modelo arquitetônico sobre o qual realizou diversas simulações energéticas. Tal modelo foi concebido tendo como base a proposta arquitetônica da Faculdade de Arquitetura (FAU) da mesma instituição (Birck, 2014), o qual se encontra apresentado na Figura 1.3.



Figura 1.3 - Proposta de modelo tridimensional de edifício nZEB (Brick, 2014)

A Figura 1.3, por sua vez, apresenta o modelo térmico utilizado nas simulações energéticas no trabalho de Pinto (2014).

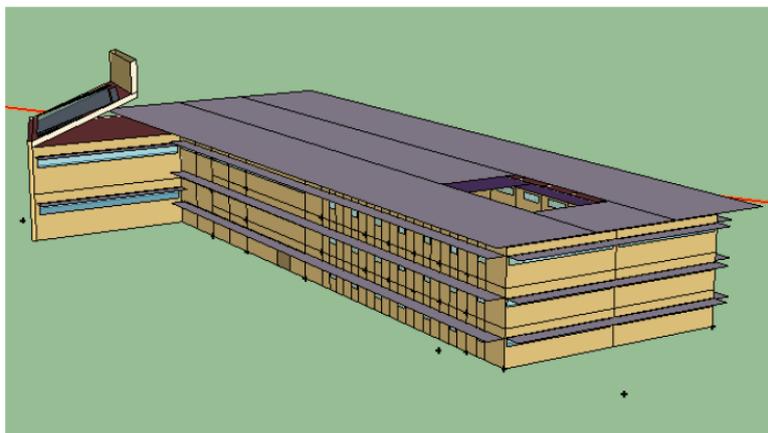


Figura 1.4 - Modelo térmico utilizado nas simulações energéticas (Pinto, 2014)

A magnitude do projeto não está apenas em seu caráter inovador em termos de Brasil, mas na interdisciplinaridade que o mesmo traz e necessita para sua concretização, além do grande potencial científico. Nesse contexto, essa edificação se presta a ser um laboratório para diversas áreas do conhecimento que compõe a Universidade de Brasília. Segundo esse conceito de um grande laboratório, as áreas envolvidas seriam:

1. Departamento de Engenharia Mecânica – atuação em questões de refrigeração do ambiente como um todo e trazendo para o projeto soluções passivas ou ativas que visem não só estabelecer o conforto térmico dos ocupantes do edifício, bem como atender a necessidades específicas de certos ambientes, como o condicionamento do ar de locais como laboratórios;
2. Departamento de Engenharia Elétrica – este departamento estaria atuando em processo e uso tecnologias de geração de energia;
3. Departamento de Engenharia Civil – estudo de estruturas que deem ao edifício ganho de eficiência energética;
4. Faculdade de Arquitetura- atuaria propondo soluções arquitetônicas que visem diminuição no gasto de energia;
5. Curso de Engenharia Mecatrônica – responsável pelo estudo de meios de otimização do consumo e produção de energia atuando em processos de controle e automação que visem alcançar tal meta.

1.2 Revisão bibliográfica

O estudo de efeitos naturais e sua aplicabilidade às tecnologias passivas com fins de aumento de eficiência energética vem sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores. Os efeitos de movimentação natural do ar, por exemplo, vem sendo cada vez mais explorados tanto em projetos como temas de pesquisas. Rohles *et al.* (1983) demonstrou em seu trabalho que a combinação de características típicas de ambientes que utilizam ventilação natural como temperaturas relativamente

altas e condições de intensidades de turbulência podem levar a obtenção de um conforto térmico, mesmo em ambientes com temperaturas superiores a 26°C, um valor tido como parâmetro de referência em normas, demonstrando uma elevação desse teto para 29°C.

A física que está por trás de um processo de ventilação natural em uma edificação é basicamente explicada por uma diferença da pressão do ar estabelecida entre a parte externa e a parte interna da edificação. Esse mecanismo logicamente não é tão simples e depende de vários fatores. Segundo Mascaró (1991) ele se presta a fazer renovação do ar interno, resfriar a estrutura do edifício; diminuindo assim o gasto energético que se teria com o uso de sistemas de ar condicionado, além de poder propiciar conforto térmico.

Allard (1998) cita que uso de ventilação natural requer uma integração da ventilação ainda no projeto de arquitetura, segundo ele, são basicamente dois os princípios físicos responsáveis pelo efeito gerado: a própria ação do vento e o efeito chaminé causado pela diferença de temperatura entre a parte interna e externa da construção em questão. São variadas as estratégias a serem implementadas em projeto.

Para uma adequação eficiente no uso de ventilação térmica, Toledo (1999) sugere uma mistura do uso da ação do vento com o efeito chaminé. Para tanto, é necessário que o fluxo de ar no exterior do prédio, devido à ação do vento, e o sentido do escoamento devido às diferenças de temperatura possam se sobrepor da melhor maneira possível a beneficiar o sistema de ventilação natural.

Chiasson (1999) apresentou em seu trabalho um estudo relativo a uso de trocadores de calor verticais utilizados para rejeitar calor para o solo. Neste trabalho o autor destaca alguns parâmetros dimensionais relativos a esse tipo de trocador de calor, bem como vantagens e desvantagens do seu uso. Entre as vantagens, o autor destaca o potencial na redução no consumo energético no uso desse tipo de estratégia e como desvantagem o alto custo inicial e a necessidade de mão de obra especializada para a perfuração do solo para implementação do sistema.

Ainda na mesma linha de estudo dos trocadores de calor vertical com o solo, Philippe *et al* (2010), publicou no *ASHRAE Journal* um estudo relativo ao dimensionamento de furo para implementação de trocadores de calor verticais. Os autores do artigo se basearam entre outras fontes, na equação de dimensionamento de *Kavanaugh e Rafferty* (1997) presente no *ASHRAE Handbooks*. Eles produziram uma planilha cálculo capaz de dimensionar o comprimento do furo para implementação do trocador de calor. O equacionamento leva em consideração aspectos físicos e geométricos relativos ao solo e ao posicionamento e o material que compõe os tubos utilizados para rejeitar o calor.

Uma solução muito interessante, que se enquadra na linha de soluções passivas, diz respeito à questão de isolamento térmico de edifícios verticais são as fachadas ventiladas, uma solução que agrega valores estéticos e funcionais.

Nessa linha de raciocínio, Gagliano *et al.* (2001) desenvolveram um modelo e um programa de cálculo visando estudar o comportamento termodinâmico de um fachada ventilada. Seus resultados

mostraram que esta solução diminui massivamente o fluxo térmico no interior das edificações. Além disso, suas simulações mostraram que no verão as fachadas ventiladas assumem um alto nível de desempenho energético, reduzindo o fluxo de calor de entrada em valores superiores a 40%, se comparadas a uma fachada não ventilada.

Carvalho (2008), utilizando o software *Energy Plus*, simulou o comportamento térmico de edifícios que utilizam fachadas ventiladas e concluiu que a maior redução de consumo energético se dá em estações do ano onde os edifícios necessitam de arrefecimento, chegando a ter casos em que essa redução de consumo chega a 60%.

Cheikh e Bouchair (2004) desenvolveram um modelo matemático para um teto evaporativo-refletivo que tem como função melhorar o resfriamento de construções em clima quente árido. Este teto é composto por uma camada de concreto, como as lajes convencionais de prédios. Seu diferencial é o acréscimo de uma camada de pedras imersas em água, seguida por um espaço preenchido por ar e finalmente folhas de alumínio que compõem a última camada deste teto. O modelo se propõe a determinar a temperatura interna dos ambientes cobertos por esse teto e comparar a temperatura de um mesmo ambiente coberto com teto convencional. As simulações consideraram o modelo situado na Argélia, e foram processadas levando-se em conta as duas mais altas temperaturas atingidas nesse país. Os resultados mostram que o novo teto é capaz de reduzir a temperatura interna dos ambientes, durante o dia, em mais de 8°C, em comparação com construções que utilizam o teto convencional.

Um estudo que propõe estratégias de controle de ventilação noturna para escritórios na China foi abordado por Wang *et al* (2009). A pesquisa se baseou em simulações feitas no software *Energy Plus* para analisar a viabilidade do uso de sistemas de ventilação noturna para o resfriamento de um ambiente típico de escritório na região Norte da China. Os resultados revelaram um bom funcionamento do sistema para os casos em que a temperatura externa era menor que a temperatura interna, além de revelar que quanto maior o tempo de operação mais eficiente se torna a técnica estudada.

Em seu trabalho Alves (2011) desenvolveu a simulação energética de diferentes edifícios e concluiu que o desempenho energético dos edifícios é influenciado por vários fatores como, por exemplo, a eficiência energética dos equipamentos interiores, a forma do edifício, o material utilizado na composição da envoltória externa, entre outros. No entanto, seus estudos apontam que as melhores possibilidades de melhorias para se obter um maior desempenho energético estão diretamente ligadas à envoltória externa, mais especificamente, paredes, coberturas e vãos envidraçados, por serem esses os maiores responsáveis pelas perdas energéticas dos edifícios de uma maneira geral.

O solo pode ser um aliado dos sistemas de refrigeração passivos de um edifício. O princípio motor desse tipo de sistemas se baseia em ambientes com diferentes temperaturas. Assim, o que se faz de modo geral é estabelecer um contato entre o edifício e o solo sobre o qual o mesmo se encontra estabelecido.

Segundo Mitajá (1986) uma boa prática para se ganhar maior contato do edifício com o solo é enterrar o edifício, encostando terra nas paredes ou se beneficiando do desnível do terreno em socalco (uma porção mais ou menos plana de um terreno em uma encosta).

As chaminés solares tem sido objeto de estudo de pesquisadores que visam explorar tecnologias passivas objetivando obter eficiência energética. Alguns trabalhos disponíveis na literatura levam em conta o efeito do vento sobre a chaminé solar como os trabalhos de Khedari et al (2000), Marques da Silva (2003) Arce et al (2009). Bansal et al (1994) ensaiou uma chaminé solar acoplada a uma torre de vento, que se pretendia induzir a ventilação natural em um edifício de vários pavimentos. Para tal ensaio foi proposto a instalação de uma chaminé nas aberturas de saída do ar dos ambientes, com o propósito de auxílio do processo de exaustão do ar. Dessa maneira, o ar incidente na torre seria captado pela entrada da torre e em seguida desviado para baixo, onde seria distribuído para os ambientes. Os resultados mostraram que o efeito da torre de vento acoplada à chaminé solar era maior para velocidades de vento reduzidas, sendo que as maiores vazões foram obtidas nos casos onde se utilizava a chaminé solar.

Estudos como o de Afonso e Oliveira (2000), constituíram uma importante constatação científica do efeito dos ventos no funcionamento de chaminés solares. Ao compararem resultados de experimentos e resultados de simulação eles concluíram que tal efeito deve ser levado em conta. Tal constatação levou os autores supracitados a proporem modificações para as equações que modela um problema de chaminé térmica, o qual passou a incorporar o efeito dos ventos.

Neves (2012) realizou um estudo visando analisar o potencial de chaminés solares na ventilação natural de edifícios de baixa altura em diferentes climas brasileiros. Este estudo se deu por meio de simulação térmica de chaminés em diversas cidades brasileiras representativas das zonas bioclimáticas do país. Em Brasília (zona bioclimática ZB4) alguns resultados construtivos de uma chaminé térmica adequada para o local foram: ângulo ótimo de inclinação do coletor com a horizontal de 10° S (para máxima irradiação), uma espessura ótima do canal de 0,3m e no caso de chaminés que utilizam extensor um comprimento ótimo de 0,6m para o mesmo.

O estudo ainda concluiu que as características climáticas do local levam à definição de uma espessura ótima para a chaminé, além de notar que a espessura constitui um fator preponderante na eficiência energética dessa tecnologia. No caso da chaminé localizada em Brasília, observou-se que ao dobrar a espessura da chaminé houve um aumento de 100% na vazão volumétrica da mesma, apresentando para o caso do uso de uma espessura ótima uma vazão volumétrica de $84 \text{ m}^3/\text{h}$. (Neves, 2012).

Uma interessante comparação foi feita no estudo acima, onde foram comparados resultados de uma chaminé solar e uma chaminé convencional para o horário de maior irradiância do solstício de verão, ambas com mesmas características geométricas. As vazões volumétricas para as chaminés solares foram maiores em um incremento que variou em uma faixa de 37% a 159%, dependendo da

cidade onde se localizava a chaminé avaliada. Cidades mais próximas à linha do equador, como Brasília, apresentaram as maiores variações. (Neves, 2012).

A estratégia de resfriamento evaporativo constitui uma importante ferramenta passiva no que diz respeito à obtenção de eficiência energética em edifícios. Camargo (2003) em seu trabalho afirma que o resfriamento evaporativo possui vantagens como: o baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, instalação e operação, além de não utilizar gases CFC ou HFC. Adicionalmente, o sistema opera com renovação total do ar, não havendo a necessidade de recirculação e a proliferação de fungos e bactérias, um problema típico de sistemas convencionais de condicionamento de ar.

Mendonça (2005), afirma que nesse processo a água da fonte utilizada se evapora absorvendo calor latente de evaporação sem que a temperatura aumente, além de aumentar a umidade do ar. Fatores externos como a agitação da fonte de água ou incidência de vento sobre a mesma ajudam a ocorrência do processo.

No Brasil foi desenvolvido um estudo por Oliveira *et al* (2009) para estimar a eficiência energética de sistemas passivos em 14 cidades brasileiras, segundo um algoritmo que leva em conta a condução de calor, a convecção, a radiação e evaporação. Três diferentes tipos de sistemas passivos foram testados. As cidades localizadas mais ao sul do país, como Porto Alegre, Curitiba, São Paulo, se mostraram mais eficientes, na medida em que, os estudos revelaram que aplicação de sistemas passivos é mais eficiente em regiões onde a necessidade de arrefecimento é menor. Essas cidades apresentaram uma redução de mais de 90% da carga de resfriamento térmico. Além disso, o estudo revelou que o tipo de solução passiva a ser adotada varia de acordo com o clima onde se deseja aplicar a mesma.

Orosa *et al* (2009) realizou um estudo a respeito de métodos passivos de controle de clima para o interior de escritórios na Espanha. Seus estudos apontam para uma economia potencial de até 3kWh/m² por ano com a utilização de métodos passivos, mantendo-se o mesmo padrão de conforto térmico. Embasados nesse e em outros resultados, os autores sugerem que se deve considerar a substituição de sistemas mecânicos HVAC por metodologias passivas, obviamente para regiões sobe mesmas condições climáticas das avaliadas no artigo citado.

Flores (2009) avaliou o uso de sistemas híbridos (sistema convencional de compressão de vapor + resfriamento evaporativo) aplicados à climatização de ambientes visando o conforto térmico e eficiência energética. Segundo uma análise de 120 horas, o sistema híbrido apresentou um consumo de energia 67.1% menor e o sistema utilizando resfriamento puramente evaporativo 77% menor se comparados a um modo de resfriamento puramente executado por compressão mecânica. Além disso, observou-se também que a redução de temperatura obtida com o uso de resfriamento evaporativo é uma variável que depende substancialmente da umidade relativa do ar na entrada desse sistema. Assim, percebe-se que quanto menor a umidade relativa do ar maior será a redução de temperatura, o que torna o sistema atrativo, do ponto de vista de eficiência energética, para climas como o de Brasília.

Santamouris e Kolokotsa (2013) apresentaram um interessante estudo de técnicas e sistemas de resfriamento passivo de edifícios e estruturas a serem utilizados como uma alternativa aos sistemas de ar condicionados, massivamente empregados no mundo moderno. Os autores fizeram uma extensa revisão bibliográfica e segundo eles as novas tecnologias passivas vêm sendo cada vez mais testadas e apontam para uma redução de até 70% no consumo energético se comparada com os sistemas de refrigeração ativa utilizados nas construções.

Moldavan *et al.* (2013) estudaram várias possibilidades conjuntas de soluções utilizando energia solar para aquecimento e resfriamento, visando transformar construções com baixo consumo energético em construções *nZEB*. Segundo as simulações realizadas neste trabalho a melhor solução contemplou o uso de ventilação natural, um sistema geotérmico ativo (bomba de calor utilizada também no sentido inverso para resfriamento) e energia gerada por um sistema fotovoltaico.

Imessad *et al.* (2014) avaliou o impacto do uso de metodologias de resfriamento passivo no consumo de energético de residências na Região do mediterrâneo. O estudo se baseou na análise de um protótipo a ser avaliado especialmente no verão. As conclusões de seus estudos foram: a inércia térmica exerce um efeito positivo sobre as estratégias de consumo de energia; o uso de estratégias passivas (*overhangs*, ventilação natural, isolamento térmico da envoltória externa) são potenciais formas de se economizar energia; simulações analisando as trocas de ar mostraram que a envoltória, a alta massa térmica e o isolamento externo da envoltória se apresentaram como as soluções com o maior potencial para economia de energia; uma ventilação natural de 8vol/h pode gerar uma redução no consumo de energia utilizada para resfriamento durante o dia que pode chegar a 10kWh/m²/ano.

Outra atraente solução que aplica técnicas passivas de funcionamento é a estratégias de se utilizar tubos enterrados para se resfriar ambientes. Aeleneia e Gonçalves (2013) apresentaram um artigo visando compartilhar suas experiências a respeito de metodologias por eles empregadas na construção portuguesa Solar XXI. Segundo os autores soluções solares passivas, estratégias de ventilação natural, técnicas de resfriamento e aquecimento passivo integradas a um sistema de energia renovável fazem do Solar XXI uma construção exemplar do ponto de vista de performance energética.

No trabalho acima é comentado os resultados obtidos com o uso de tal tecnologia no Solar XXI. No caso em questão, um total de 32 tubos com 30 cm de diâmetro foram utilizados. Segundo os autores, a temperatura do ar que é insuflado no interior dos escritórios está num faixa de 22-23°C, e é responsável por gerar uma variação de 2-3°C na temperatura do ar do ambiente.

Pinto (2014) apresentou a proposta de uma edificação experimental com balanço energético nulo para Universidade de Brasília. Por meio de simulação termoenergética utilizando o software *Energy Plus*, foi avaliado o consumo e a capacidade de produção de energia no período de um ano de clima típico da cidade de Brasília. A proposta de edificação prevê o uso de diversas soluções para climatização e ventilação do edifício. Algumas delas são: uso de tubos enterrados, chaminé solar, sistema híbrido de resfriamento (compressão a vapor + resfriamento evaporativo).

Dentre os resultados obtidos por Pinto (2014) pode se apontar principalmente o alcance de um balanço energético nulo segundo as simulações do modelo térmico concebido. Isso significa que o prédio será capaz de produzir mais energia do que irá consumir. Em números relativos esse superávit é de 23,5% da energia consumida pelo edifício experimental o que pode ser traduzido como: o ideal nZEB foi atingido.

Os resultados ainda apontaram a necessidade de utilização de climatização ativa, o que foi constatado segundo uma avaliação do PMV (índice que prevê o valor de avaliação do clima médio de um grande grupo de pessoas). Os dados apresentados indicam o PMV fora das regiões de conforto.

As revisão bibliográfica acima postada demonstra a existência de várias soluções a serem implementadas em edifícios que possuem como objetivo maior um aumento da eficiência energética. Percebe-se, no entanto, uma carência de estudos e conseqüentemente a falta de dados associados a esses ganhos energéticos relacionados ao clima de Brasília.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo dar continuidade ao processo de concepção do projeto de climatização do edifício nZEB proposto para Universidade de Brasília.

Associado a este objetivo central temos os seguintes objetivos complementares:

- Atualização da arquitetura do edifício utilizado no trabalho inicial;
- Simulação termoenergética do modelo, incorporando as mudanças de layout arquitetônico;
- Análise termoenergética do edifício em evolução livre e avaliação da necessidade de um sistema de climatização ativo;
- Cálculo de carga térmica do edifício;
- Análise de soluções ativas de climatização;
- Proposição de um sistema híbrido que vise não só climatizar o prédio e gerar conforto térmico, mas também possua flexibilidade de uso; dado o caráter experimental da proposta;
- Gerar uma breve análise da potencial de geração de energia elétrica com painéis fotovoltaicos;
- Análise de viabilidade do conceito nZEB para edificação proposta;

1.4 Metodologia

Iniciou-se o estudo com uma apresentação do tema e uma contextualização do mesmo dentro da conjectura atual, de maneira a se entender a relevância do tema proposto. Sendo assim, foi

realizado um revisão bibliográfica da literatura visando mostrar aspectos de eficiência energética que se inserem dentro da concepção de construções nZEB.

Uma vez que este trabalho constitui uma continuação do Projeto de Graduação apresentado pelo aluno Geraldo Souza Pithon Pinto (Pinto, 2014) pela Universidade de Brasília, consta na revisão bibliográfica, e em outras secções deste relatório, aspectos gerais do trabalho inicial desenvolvido, visando dar contexto ao presente relatório.

Concomitantemente, a equipe de arquitetura trabalhou em mudanças da proposta arquitetônica original, se baseando para isso em resultados de simulação termoenergética apresentadas no trabalho de Pinto (2014).

Atualizada a nova arquitetura, analisou-se o novo modelo térmico por meio de simulação termoenergética, empregando para tal tarefa o *software Energy Plus*. Os resultados dessa etapa foram dados de conforto térmico em evolução livre e a carga térmica do edifício, o que permitiu dar sequência ao cerne deste trabalho que é a análise de soluções ativas de climatização para atender a demanda do edifício.

De posse dos resultados de carga térmica, uma série de simulações foi processada a fim de se definir um sistema versátil e eficiente do ponto de vista energético. A ideia básica foi começar por soluções que empreguem o menor consumo energético, e em seguida ir agregando soluções que dispendem de mais energia para o seu funcionamento até se atender de forma completa o conforto térmico do edifício. O fase final consiste na otimização dos sistemas que apresentarem boa eficiência energética.

Paralelamente, foi avaliada a capacidade de geração de energia do sistema de painéis fotovoltaicos pensados para a proposta. Esta análise se processou no *software System Advisor Model*.

Por último, avaliou-se a produção e o consumo de energia elétrica da edificação. Um balanço foi feito entre essas duas parcelas visando-se verificar a viabilidade técnica de um balanço energético nulo para incluindo a nova proposta de climatização apresentada neste trabalho.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por nove capítulos. Cada capítulo, em sua devida ordem, tem por dever construir uma linha de raciocínio para que seja cumprido o objetivo deste trabalho (seção 1.3) segundo a metodologia disposta na seção 1.4.

A introdução se propõe a expor objeto de estudo, apresentar fatores técnicos científicos que justifiquem o estudo do mesmo, além de apresentar a metodologia a ser seguida para que se alcance o objetivo proposto. O segundo capítulo traz um resumo do conceito nZEB e seu atual estágio de desenvolvimento. O terceiro capítulo se presta a trazer com mais detalhes o conceito de simulação termoenergética, bem como as ferramentas utilizadas em tal análise. O quarto capítulo tem como meta apresentar a proposta de um edifício experimental nZEB para a Universidade de Brasília, desde de sua

concepção original até seu estágio atual de desenvolvimento. O quinto capítulo conterà aspectos relacionados à simulação realizada em cima do modelo proposto pela equipe de arquitetura. O capítulo seguinte apresentara uma análise preliminar do edifício em evolução livre. O capítulo sétimo contemplara aspectos ligados aos sistemas HVAC analisados para proposta. O oitavo capítulo e constituído pela análise de geração de energia elétrica para edificação. O nono e último capítulo será designado a concluir o estudo.

2 CONCEITO NZEB E SEU ESTÁGIO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO

Este capítulo se presta a apresentar o conceito nZEB na conjuntura atual bem como o seu desenvolvimento no mundo.

2.1 Aspectos gerais

A sigla nZEB que é inglês quer dizer *Net Zero Energy Building* vem ganhado a atenção do mundo pelo contexto energético que o mundo como um todo vive. Além disso, a dependência com relação a determinadas fontes de energia não renováveis que poluem e causam outros efeitos negativos ao meio ambiente tem impulsionado o homem do século XIX a pensar em maneiras eficientes de se usar a energia disponível.

A concepção de um edifício segundo um conceito nZEB constitui uma atividade multi disciplinar. Conceber tal projeto exige se preocupar com vários aspectos como, por exemplo, o posicionamento do prédio, os materiais a serem empregados em sua construção, à disposição e divisão dos seus espaços, usa de elementos arquitetônicos que permita a estrutura fazer uso de fatores naturais como luz, calor, frio, ventos, entre outros para promover a realização de tarefas que despenderiam um uso ativo de energia, ou seja, um processo forçado para se obter uma determinada condição, onde o preço a ser pago é a disponibilização de energia para os sistemas visando se realizar trabalho.

Percebe-se que em projeto nZEB várias áreas do conhecimento são tocadas e convidadas a integrar o projeto em prol de unir seus esforços afim de produzir um construção eficiente que ao fim de um ciclo de um ano seja capaz de gerar tanta energia quanto a sua necessidade de consumo, ou em alguns casos até superar esse valor. Ao redor do mundo esses esforços tem tomado vida e constituem um importante passo na busca por um mundo mais eficiente no que concerne ao uso racional de energia.

Rumo a atingir o conceito NZEB, a primeira atitude a ser tomada é a eliminação dos desperdícios. A segunda etapa passa por implementar o uso de recursos naturais de forma a produzir processos de forma passiva, ou seja, sem que haja a necessidade de disponibilizar aos sistemas. O terceiro passo consiste em perceber que energia tem qualidade e deve ser compatibilizada segundo aspectos hierárquicos dos processos dependentes de seu uso. Por último, caso seja necessário dar aos sistemas energia, que esta seja fruto de fontes naturais e renováveis.

Tomando como base a descrição feita no paragrafo acima, percebe-se que nem todos os edifícios do mundo podem se tornar NZEB, e isso se deve a diversos fatores podendo ser citado questões climáticas extremas (lugares muito frio ou muito quente), fatores arquitetônicos (edifícios muito altos impõe restrições ao uso de sistemas passivos) entre outras. No entanto, isso não impede que o prédio busque eficiência energética. Essa pode não ser completa. Esse é um conceito que vem

sendo discutido, as *nnZEB* ou *Nearly Net Zero Energy Building* (construções que se aproxima de um balanço energético nulo).

2.2 Projetos *nZEB*

Em termos gerais, os Estado Unidos da América e a Europa são a regiões do mundo com o maior número de desenvolvimento de projetos de edificações a luz *nZEB*, desde de grandes edifícios até mesmo casas. Verifica-se também o empenho de Universidades em desenvolver edifícios experimentais, como se propõe este trabalho. No teto que segue dessa seção serão apresentados algumas edificações e os conceitos exploradas em cada uma delas e que as tornam um objeto de estudo interessante frente ao conceito *nZEB*.

Na Alemanha, em 2005, o Edifício Blaue Heimat, **Figura 2.1**, construído em 1951, teve seu layout alterado visando obter um balanço energético nulo. Obviamente que prever no projeto original conceitos que visem alcançar um balanço energético nulo constitui uma ação que evitara problemas e facilitará a implementação e otimização do processo. No entanto, um projeto já concretizado pode passar por um remodelamento se preste a reduzir seu consumo energético. Nesse caso em questão, algumas das ideias implementadas que permitiram ao Edifício Blaue Heimat ser caracterizado segundo um conceito *nZEB* foram: um aumento do nível de isolamento térmico das paredes exteriores, cobertura e laje de soleira (remodelagem da envoltória como um todo, uso de janelas triplas, implementação de um sistema de recuperação de calor e a instalação de sombreamentos. (Herkel e Kagerer, 2011).



Figura 2.1 - Edifício Blaue Heimet, Alemanha (Herkel e Kagerer, 2011)

Em Portugal, na cidade de Lisboa, foi construído em 2006 o Edifício Solar XXI. Este edifício utiliza conceitos de sistemas de arrefecimento passivos por tubos enterrados, sistemas de painéis fotovoltaicos/solar térmico (aproveitamento da fachada fotovoltaica, por convecção natural), sistemas de ventilação e iluminação natural, além de vãos envidraçados constituídos por vidro duplo incolor, o quais são protegidos por estores exteriores de lâminas reguláveis e otimização da envolvente, reduzindo as cargas térmicas do edifício.(Gonçalves, 2005)



Figura 2.2 - Edifício Solar XXI, Portugal. (Golçalves, 2006)

Pela Universidade de Nova Lisboa Ferreira(2012) apresentou um estudo referente a soluções de otimização para Edifícios de Balanço Energético Nulo. O estudo traz a simulação energética unifamiliar cujo projeto se baseia em soluções construtivas que levem a construção a atingir um balanço energético nulo além de apresentar otimização de algoritmos utilizados em simulação térmica.

A Universidade de São Paulo tem como um de seus projetos o Centro de Estudos de Clima e Ambientes Sustentáveis (Cecas). O projeto é fruto da parceria entre o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) e a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU). A Figura 2.3traz um modelo em três dimensões do projeto CECAS. Em linhas gerais o projeto foi fundamentado em três pilares: busca de uma maximização da relação arquitetura versus clima, como uma maneira de reduzir os futuros consumos energéticos (tecnologias solares passivas); a utilização das tecnologias ativas com eficientes e a implantação de iniciativas de sustentabilidade que visem uma e redução do impacto ambiental não só na etapa de construção, mas também nas etapas de uso e operação do edifício. O projeto conta com sistema de resfriamento geotérmico, painéis fotovoltaicos (geração de energia elétrica na cobertura e nos vidros dos átrios centrais) e captura e tratamento de 90% das águas pluviais, aquecimento solar da água quente em todos os banheiros e vestiários, sistema automatizado de iluminação artificial. (USPDIGITAL, 2010)

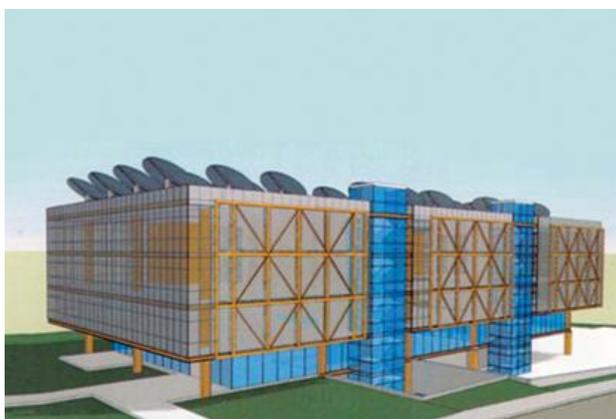


Figura 2.3 - Modelo 3D do projeto CECAS (USP Digital, 2010)

Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) Siqueira (2011) e Torres (2011) apresentaram o projeto de um Prédio de Energia Líquida Zero (PELZ). O prédio tem um caráter experimental inserido em um ambiente acadêmico. O projeto foi concebido utilizando-se como principal ferramenta a simulação feita a partir do *software Energy Plus*. Quanto à geração de energia o projeto prevê o uso de painéis fotovoltaicos. Como estratégias relacionadas à iluminação utilizou-se sensores fotoelétricos, dimerização para controle da iluminação artificial, prateleiras de luz para difundir e homogeneizar a iluminação natural, além de equipamentos eficientes. Segunda a simulação, o prédio é capaz de produzir um saldo nulo de energia, o que significa em termos práticos uma produção de energia que supera a demanda do prédio.

A casaE, Casa de Eficiência Energética da BASF (empresa do ramo químico), fez em 2014 um ano de existência. O que se destaca nessa construção é o sistema construtivo em EPS (reciclável), popularmente conhecido como isopor. Outra inovação é o uso de Mastertop, piso que é aplicado em camadas e que pode ter uma delas em material para isolamento acústico, e pelos pigmentos frios, que refletem a luz do sol, impedindo a absorção do calor. A superfície permanece fria mesmo quando pintada em cores escuras. Além disso, o Micronal, outro material empregado nessa construção: são micropartículas que têm parafina em seu interior, promovendo a troca de calor com o ambiente e mantendo a temperatura agradável. É aplicado na massa corrida ou gesso e pode reduzir em 1/3 o uso do ar condicionado. Em termos de geração de energia a construção emprega painéis solares e placas fotovoltaicas com sistema smart grid, que não usa bateria e envia o excedente de energia para rede pública. (PROCELINFO, 2013).

3 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

Este capítulo se destina a apresentar os conceitos de simulação termoenergética, seu potencial como ferramenta de análise, bem como os softwares utilizados no presente relatório para desenvolver a simulação do modelo nZEB proposto.

3.1 Conceito

O processo de simulação energética consiste na realização de estudos em eficiência energética buscando avaliar o perfil de consumo de um dado edifício, ao longo do período de um ano. O modelo utilizado como base dessa avaliação deve possuir as características do projeto real; já implementado ou que se deseja implementar. Entre estas características estão: os detalhes arquitetônicos (relativos à forma e composição de estruturas que compõe a envoltória da construção), informações sobre o projeto luminotécnico, os equipamentos utilizados no edifício, as instalações de ar condicionado, cronogramas de uso e ocupação, entre outros detalhes. Reunido essas informações em um modelo e agregando a esse banco de dados informações climatológicas do local onde se encontra o modelo avaliado é possível identificar o consumo do mesmo e em seguida propor alternativas para elevar o desempenho energético da proposta.

O processo de simulação como um todo, se divide em três grandes etapas como mostra a Figura 3.1.

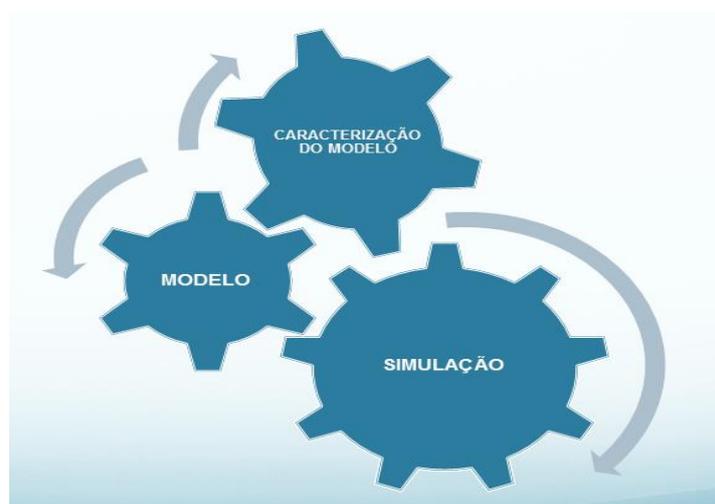


Figura 3.1 - Etapas do processo de simulação termoenergética.

Em primeiro lugar um modelo tri-dimensional da edificação é feito. Este modelo é então caracterizado (nesta etapa se inserem parâmetros arquitetônicos, parâmetros dos sistemas de iluminação, equipamentos, sistema HVAC, cronogramas de uso e ocupação, utilizados no projeto real). A terceira é última etapa, chamado na figura acima de “Simulação”, constitui a etapa do processo onde todas as informações adicionadas ao modelo irão se juntar a dados relativos ao clima do

local e a um complexo sistema de equações físicas que governam os diversos processos energéticos de um edifício real. Ao fim dessa etapa uma extensa gama de resultados será gerada.

O comprimento das três grandes etapas acima citadas constitui um trabalho árduo e repetitivo e, por isso, o processo acima descrito é sempre desenvolvido com o auxílio de computadores e softwares. Atualmente é extensa a lista de softwares capazes de cumprir tal tarefa. Especificamente, o presente trabalho optou por utilizar um software gratuito, o *Energyplus*. Como ferramentas de apoio, dois outros *softwares* foram utilizados no processo: *Sketchup* e o *Openstudio*. Informações mais consistentes a respeito desses programas serão apresentadas nas seções subsequentes.

3.2 Softwares

3.2.1 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética utilizado por profissionais como engenheiros, arquitetos e pesquisadores para modelar aspectos relacionados ao uso de energia e água em edifícios. O programa permite a esses profissionais obtenham estimativas reais de consumo energético, permitindo que o projeto passe por otimizações antes mesmo que seja construído. Este *software* foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, tendo como base os *softwares* DOE-2 e o *BLAST*, que foram desenvolvidos e lançados no fim dos anos 70 como ferramentas de simulação de cargas e energia.

O software dispõe de modelos de sistemas reais de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação, outros fluxos de energia e uso da água. Uma das grandes vantagens desse programa é a sua capacidade de incluir espaços de tempo pequenos em suas simulações, sistemas modulares e integrados, considerações e modelos sobre o uso da água, ventilação natural, sistemas fotovoltaicos, entre outras possibilidades. Note que a integração de um edifício simulado no *EnergyPlus* é generalizada, permitindo uma análise bem precisa do funcionamento dos sistemas, antes mesmo de serem construídos.

O método de cálculo de carga térmica utilizado pelo *EnergyPlus* é o *Heat Balance Method*. Este método tem como base um balanço energético aplicado entre as superfícies interiores e exteriores da envolvente opaca e envidraçada e o ar interior da zona. (ASHRAE, 2009). Assim, este método assegura que todo fluxo de energia em cada zona é balanceado, e envolve a solução de um conjunto de equações de balanço de energia para o ar no interior das zonas, superfícies internas e externas das paredes, teto e chão. Segundo McQuiston, Parker e Spitler (2005) essas equações de balanço de energia são combinadas com equações para transferência de calor por condução transiente pelas paredes e tetos, e arquivos climáticos compilados e tratados estatisticamente. Entre as informações contidas nos arquivos climáticos estão a temperatura de bulbo seco do ar externo, temperatura de bulbo úmido, radiação solar, entre outros dados importantíssimos para os cálculos de carga térmica, efetuados pelo programa.

Em tese, todo o processo contemplado pela simulação energética poderia ser desenvolvido diretamente no *EnergyPlus*. Entretanto, o próprio manual do programa não recomenda que se faça isso. Isso porque o programa apresenta uma interface pouco amigável e intuitiva como mostra a Figura 3.2.

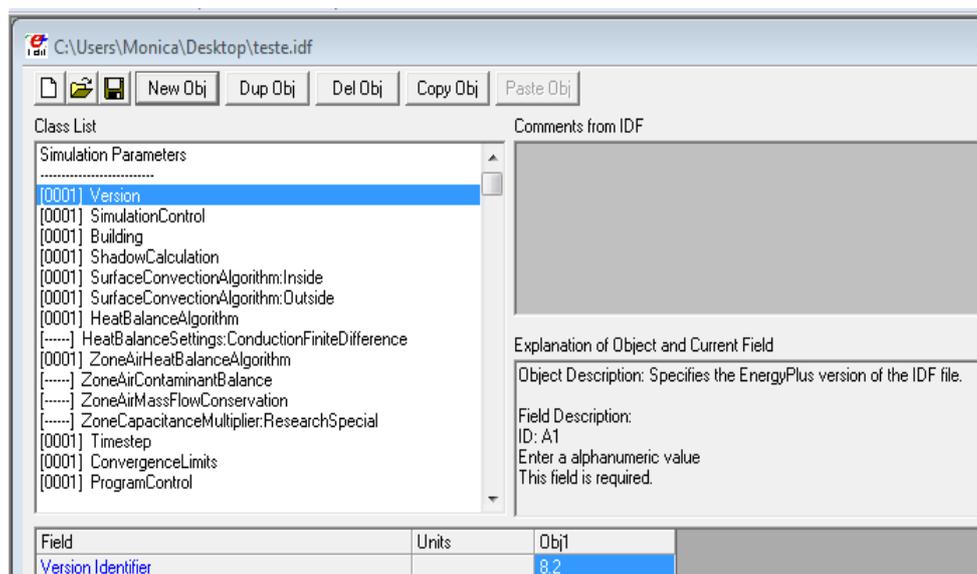


Figura 3.2 - Interface do programa Energyplus.

Nesse contexto, outros softwares e plug-ins podem ser utilizados como apoio ao processo de simulação. Na sequência será apresentado um software é um *plug-in*, utilizados como apoio ao processo de modelagem de edifícios no *EnergyPlus*.

3.2.2 Skecthup

Este software é utilizado para criação de modelos em 3D no computador por diversos tipos de profissionais. Ele está disponível basicamente em duas versões: a versão profissional, *Pro*, e a versão gratuita, *Make*. Nele é possível desenhar toda a envoltória do modelo bem como suas particularidades como áreas de fenestração, portas, detalhes de sombreamento: em resumo a parte física do modelo. Este software permite o cumprimento da primeira fase de uma simulação termoenergética. A Figura 3.3 apresenta a interface do programa.

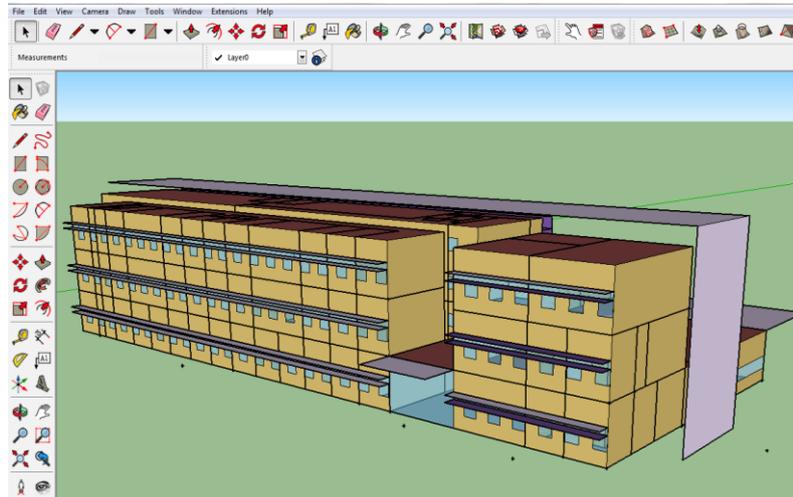


Figura 3.3 - Interface do *software Sketup Make*.

A ferramenta possui uma imensa capacidade: seus recursos são ilimitados. A versão *Pro* do programa é sem duvidas alguma mais completa que sua versão gratuita. Entretanto, para o desenvolvinto do trabalho em questão, a versão gratuita, émais que suficiente. Ela supre de forma completa as necessecidades do modelo que será submetido ao porcesso de simulação energética.

3.2.3 Openstudio

OpenStudio é cosntituído por uma coleção de ferramentas de diferentes *softwares* para apoiar a modelagem de energia no*EnergyPlus*. Esta ferramenta é o elo entre o modelo 3D desenvolvido no *Sketchup* e o *Energyplus*. Toda etapa de caracterização do modelo e dos sistemas utilizados serão descritas por esse *software*. Vale lembrar que tanto a modelagem em três dimensões no *Sketchup* e a caracterização do modelo feita com o *Openstudio* são dispensáveis como explicado acima. Apenas com o software *Energyplstodas* essas etapas poderiam ser excutadas. Vale lembrar, porém, que o manual do próprio *Energyplus* recomenda que isso não seja feito. E vai além: o site responsável por disponibilizar o *Energyplus* recomenda o uso do *Openstudio* como ferramenta de apoio do processo. E explicação pra isso é simples: o *software Openstudio* pussui uma interface amigavel e intuitiva, características essas não aplicavés ao *Energyplus*. A Figura 3.4apresenta a interface do programa.



Figura 3.4 - Interface do *software Openstudio*.

Além de colaborar com o pré-processo de simulação termoenégetica, o *Openstudio* ainda dispõe de recursos de pós-processamento, tratando os resultados obtidos pelo *Energyplus* e apresetando os mesmos em formatos que facilitam o processo de análise dos resultados gerados.

4 A PROPOSTA DE EDIFICAÇÃO NZEB PARA UnB

Este capítulo apresenta aspectos gerais da estrutura do edifício em sua fase primária, bem como as atualizações de projetos pelas quais a proposta inicial passou.

4.1 Proposta arquitetônica inicial

No trabalho de Pinto (2014) é apresentado o terreno onde supostamente seria construído o edifício. Ele estaria localizado no Parque Científico e Tecnológico, no campus Darcy Ribeiro. A Figura 4.1 abaixo apresenta um detalhamento da localização escolhida junto ao Centro de Planejamento da UnB.



Figura 4.1 - Localização do terreno para construção do Edifício nZEB. (Pinto, 2014)

O edifício em seu estado primário foi concebido por alunos e professores da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de Brasília (UnB).

Em suma, o prédio experimental é composto por salas multiuso, laboratórios, auditórios, e escritórios sendo todos estes ambientes propostos dentro de um conceito de eficiência energética. A ideia inicial é que quatro departamentos da UnB componham uma equipe que irá coordenar o edifício, de forma que cada departamento em sua respectiva área busque, em termos de projeto, dar a construção um caráter de prédio eficiente do ponto de vista energético. Essa equipe seria composta por

pessoas dos seguintes departamentos: Departamento de Engenharia Mecânica, Engenharia Elétrica, Engenharia Civil e por integrantes da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. A Figura 4.2 abaixo apresenta o plano de necessidades desenvolvido pela FAU na primeira etapa do projeto tratado no trabalho de Pinto (2014) e Birck (2014).

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 4.2 - Plano de necessidades desenvolvido pela FAU. (Pinto, 2014)

Para acomodação dos espaços acima referidos foi proposto um modelo arquitetônico composto por três andares, como pode ser visto na Figura 4.3 abaixo, onde uma representação do modelo tridimensional descrito acima e apresentada.



Figura 4.3 - Modelo tridimensional proposto inicialmente pela equipe de arquitetura (Birck, 2014)

O modelo acima foi concebido visando-se dar uma ampla exposição aos painéis fotovoltaicos biarticulados utilizados na geração de energia do prédio, além de considerar o uso de painéis fotovoltaicos nas persianas externas posicionadas na faixa noroeste do edifício. Exploraram-se também aspectos construtivos relacionados à ventilação natural como, por exemplo, uma longa fachada na parte sudoeste do prédio, onde os ventos são predominantes, um átrio central na região dos escritórios, responsável por geral circulação da massa de ar por convecção e um parede posicionada a noroeste onde será implantada uma chaminé solar, que se prestara a gerar nos laboratórios uma pressão negativa no período vespertino.

4.2 A proposta arquitetônica atualizada

Tendo como base a estrutura apresenta acima e se baseando em resultados de simulações feitas por Pinto (2014), a equipe da FAU propôs mudanças no *layout* do modelo inicial. Em primeiro lugar, a grande mudança foi à divisão do modelo acima em três edifícios menores, integrados por rampas. Essa nova estrutura pode ser verificada na Figura 4.4abaixo.

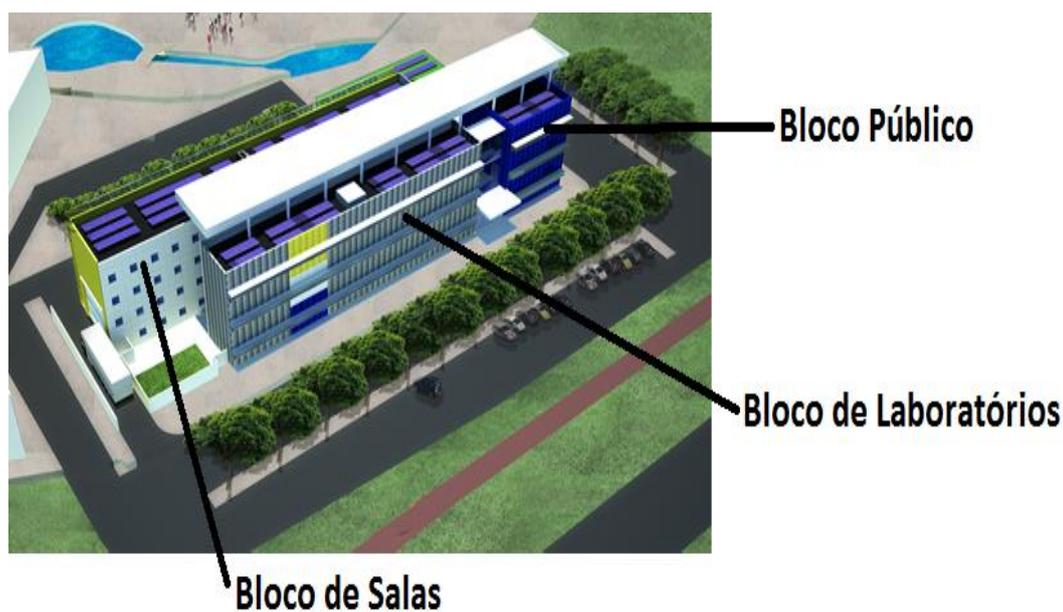


Figura 4.4 - Modelo tridimensional proposto pela FAU, atualizado. (Birck, 2014)

Em linhas gerais o prédio é composto por três grandes blocos: Bloco de Laboratórios, Bloco de Salas e o Bloco Público. Esta divisão é baseada em tipos de uso que se pretende dar ao edifício.

Na fachada frontal do bloco de laboratório foi idealizada uma estrutura com painéis perfurados a serem posicionados ao longo da fachada, além de extensões de sombreamento (*overhangs*) que se prologam sobre as janelas da fachada, visando gerar sombra. Acima dos três blocos foi colocada uma grande extensão de sombreamento, representado em branco na figura acima. As estruturas em azul

posicionadas sobre a área de cobertura representam os painéis fotovoltaicos a serem utilizados na geração de energia elétrica para o edifício.

O mesmo sistema de *overhangs* foi utilizado sobre as janelas da faixa da do Bloco de Salas e do Bloco Público. O auditório, parte integrante do bloco público também possui uma extensão de sombreamento sobre sua faixa envidraçada.

Na seção anexo deste trabalho estarão disponíveis as plantas baixas do edifício e seus respectivos pavimentos. Nessa planta está presente a localização e área de cada ambiente apresentado na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Relação dos ambientes contemplados pela proposta atualizada.

Tipo de Ambiente	Quantidade
Sala para professores/coordenador	2
Sala para pesquisadores	2
Sala de reunião	1
Salas para empresas	4
Laboratório de experimentação	4
Sala multiuso	5
Auditório e Apoio	1
Salas administrativas	6
Sanitário	24
Lixeira	8
Depósito	8
Circulação	8

Outro importante aspecto levando em consideração foi à composição da envoltória (envelope) e das divisões internas. A equipe de arquitetura teve o cuidado de analisar parede a parede, a fim de determinar uma composição adequada a cada uma das estruturas utilizadas na composição do edifício. Como visto na revisão bibliográfica e nos resultados apresentados no trabalho de Pinto (2014), é possível notar o quanto estes parâmetros devem ser bem escolhidos a fim de gerar uma envoltória que seja eficiente do ponto de vista energético. Esta escolha irá interferir de forma direta na carga térmica calculada para o edifício. O capítulo seguinte irá apresentar com mais riqueza de detalhes, camada a camada utilizada para compor todas as paredes; internas e externas, lajes e o telhado da edificação atualizada. Além disso, serão apresentados todos os parâmetros físicos relevantes, de cada material, para execução da simulação termoenergética do modelo.

5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo irá apresentar os parâmetros utilizados na simulação energética da edificação nZEB.

5.1 O modelo termoenergético

Esta seção se inicia apresentando, **Figura 5.1**, a nomenclatura dos blocos, a fim de organizar a estrutura a ser trabalhada na sequência do relatório.

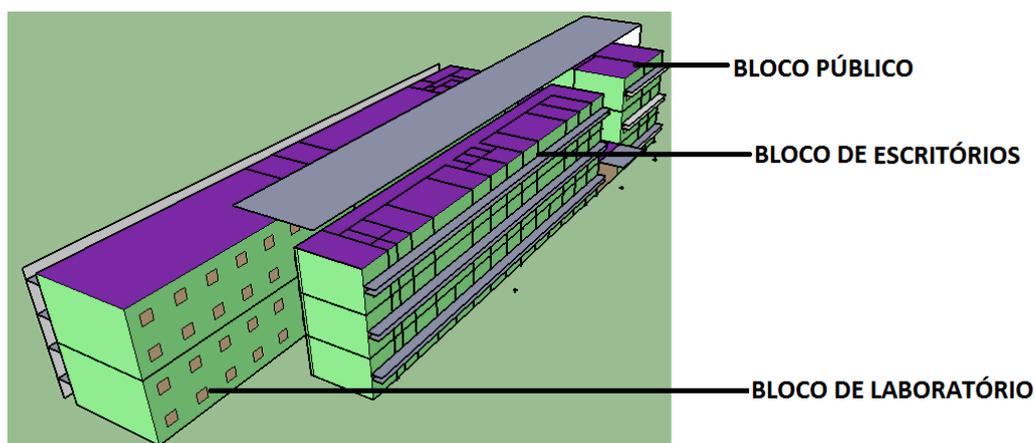


Figura 5.1 - Modelo termoenergético atualizado.

O modelo termoenergético nada mais é do que uma representação do modelo físico real que se pretende construir, onde se busca agregar todos os parâmetros e aspectos físicos que de alguma forma influenciam no comportamento termoenergético do edifício. Alguns aspectos da figura acima merecem destaque. São eles:

- Em roxo verificam-se superfícies de cobertura externa que estão expostas ao vento e ao sol, além é claro, de outras condições temporais;
- Em verde verificam-se superfícies de paredes externas. Estas, assim como os telhados, estão expostas as ações da natureza;
- Em cinza, verificam-se superfícies de sombreamento adotadas pela equipe de arquitetura;
- Em bege, observam-se as áreas de fenestração, áreas por onde e possível que a luz solar adentre o ambiente interno.

5.2 Características da envoltória

Na sequência será apresentada uma tabela contendo os componentes de cada estrutura do modelo, bem como as propriedades físicas dos materiais utilizados para caracterizar a envoltória apresentada na Figura 5.1.

As tabelas que serão apresentadas na sequência estão organizadas de forma a apresentar cada camada de material utilizada na composição de paredes, lajes e telhados; mostrando as camadas mais externas a mais internas de cada construção. É apresentado também as propriedades do vidro utilizado nas regiões de fenestração do modelo. Vale notar que por opção da equipe da FAU a envoltória apresenta composição diferenciada para um mesmo tipo de construção, em outras palavras, a laje de um bloco pode ser diferente em termos de composição de materiais da laje de outro bloco.

5.2.1 Paredes

As paredes exteriores apresentam uma composição apresentada pela Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 - Propriedades dos materiais construtivos das paredes externas do edifício.

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	ABSORTÂNCIA SOLAR	CONSTRUÇÃO
CAMADA MAIS INTERNA						
ARGAMASSA	25	1,5	1950	1000	0,4	PAREDE EXTERNA
BLOCO DE CONCRETO	140	1,72	2243	837	0,65	
ARGAMASSA	25	1,5	1950	1000	0,4	
CÂMARA DE AR	40	–	–	–	–	
ALUMÍNIO COMPOSTO	50	230	2700	880	0,7	
CAMADA MAIS EXTERNA						

Vale ressaltar que as resistências térmicas de convecção superficiais interiores e exteriores são calculadas pelo próprio *EnergyPlus*. As paredes interiores apresentam o padrão construtivo mostrado na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais construtivos das paredes internas do edifício.

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	ABSORTÂNCIA SOLAR	CONSTRUÇÃO
CAMADA MAIS INTERNA						
DRY WALL	15	0,35	750	840	0,5	PAREDE INTERNA
LÃ DE VIDRO	70	0,04	20		0,6	
DRY WALL	15	0,35	750	840	0,5	
CAMADA MAIS EXTERNA						

5.2.2 Lajes e coberturas

As lajes interiores apresentam uma composição apresentada pela Tabela 5.3 abaixo.

Tabela 5.3 - Propriedades dos materiais construtivos das lajes internas do edifício.

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	ABSORTÂNCIA SOLAR	CONSTRUÇÃO
CAMADA MAIS INTERNA						
FORRO DE GESSO	20	0,35	1000	840	0,5	LAJE INTERNA
CAMARA DE AR	1100	–	–	–	–	
TELHA TERMO ACÚSTICA TOP STELL	20	0,03	209	1670	0,2	
CAMADA MAIS EXTERNA						

Como mencionado acima, as lajes de coberturas apresentam padrões diferentes. As tabelas subsequentes apresentam a informação dos dois padrões utilizados, bem como o local onde foram aplicados na modelagem.

Tabela 5.4 - Propriedades dos materiais construtivos das lajes de cobertura dos Blocos de Escritórios e Bloco Público.

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	ABSORTÂNCIA SOLAR	CONSTRUÇÃO
CAMADA MAIS INTERNA						
FORRO DE GESSO	20	0,35	1000	840	0,5	LAJE DE COBERTURA DO BLOCO DE ESCRITÓRIOS E DO BLOCO PÚBLICO
CAMADA DE AR	350	350	–	–	–	
LAJE STELL DECK	250	1.75	2300	1000	0,7	
ARGAMASSA	20	1,5	1950	1000	0,4	
MANTA ASFÁLTICA	0,5	0,17	1000	1460	0,5	
LÃ DE ROCHA	70	0,045	110	750	0,5	
BRITA	50	0,7	1500	800	0,5	
PISO CERÂMICO	10	0,7	1500	920	0,5	
CAMADA MAIS EXTERNA						

5.2.3 Janelas

Para as áreas envidraçadas foi adotado um vidro com coeficiente de transferência de calor $U = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$, um coeficiente de ganho de calor igual a 0,349 e uma transmitância visível de 0,67.

5.3 Clima e o arquivo climático

Por apresentar características térmicas e de precipitação impostas pela altitude, o clima da cidade de Brasília é classificado como Tropical de Altitude. Em linhas gerais, pode se caracterizar o clima local, quanto à temperatura e humidade ao longo do ano da seguinte maneira: um período quente e úmido, de outubro a 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. Segundo Pinto (2014), o mês de setembro é apresentado como um dos piores, do ponto de vista do conforto térmico, pois combina elevadas temperaturas e baixa umidade.

Para simulação termoenergética foi utilizado o arquivo climático disponibilizado e recomendado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)*. De acordo com a norma *ASHRAE 90.1*, Brasília é enquadrada na zona climática 1A. O arquivo utilizado foi o *ASHRAE International Weather for Energy Calculations (IWEC)*, composto por dados meteorológicos anuais e dados relativos a dias típicos de projeto. Basicamente, o primeiro pacote reúne dados meteorológicos para as 8760 horas do ano. Ele é utilizado para avaliar o desempenho anual do edifício, enquanto que o segundo é utilizado para projetar o sistema de climatização. O dia 21 de outubro é definido como um dia crítico de verão de Brasília, segundo a *Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook*.

Ambos os pacotes acima citados são resultados da compilação de dados climatológicos coletados ao longo de 18 anos. Baseando-se nesse período, os dados foram selecionados utilizando argumentos estatísticos, e gerando como produto final os arquivos climáticos utilizados nesse projeto.

5.4 Tipos de espaços e cargas internas

Os ambientes do edifício foram enquadrados em tipos de espaço, metodologia essa adotada e recomendada pela *ASHRAE*. Os tipos de espaço utilizados foram:

- a) Escritórios;
- b) Salas;
- c) Laboratórios;
- d) Corredores;
- e) Escadas;
- f) Auditório;
- g) Áreas de circulação;
- h) Banheiros;
- i) Depósitos;

Todos os ambientes do edifício foram enquadrados em um dos grupos acima relacionados. Para determinação do número de ocupantes por ambiente adotou-se valores recomendados pela NBR 16401, parte 3, segundo o tipo de espaço no qual o ambiente foi enquadrado. Para a taxa de dissipação de calor por pessoa adotou-se um valor de 120 W/pessoa (NBR 16401).

Os níveis de iluminação adotados e o tipo de lâmpada utilizada como referência para o cálculo de densidade de carga seguiram como referência o trabalho desenvolvido por Pinto (2014). A lâmpada

adotada é uma lâmpada que utiliza tecnologia LED, do fabricante *Cree*. Ela possui uma eficiência de 102 Lúmens/Watt.

Para as densidades de carga de equipamentos foram utilizados valores de referência recomendados pela NBR 16401, segundo o tipo espaço.

No que concerne às taxas de renovação foram adotados valores padrão para tipos de espaço segundo *ASHRAE*, o qual leva em conta fatores de pessoas e área para determinar quais os valores mínimos de renovação de ar que devem ser promovidos para cada ambiente.

Com respeito à infiltração, essa foi considerada desprezível uma vez que o sistema de ventilação mecânica deverá manter os ambientes pressurizados por meio do insuflamento de ar. A Tabela 5.5 traz um resumo de todos os parâmetros de carga utilizado para cada tipo de ambiente.

Tabela 5.5 - Parâmetros de cargas internas adotados por tipo de espaço.

Tipo de Espaço	Iluminação (W/m ²)	Equipamentos (W/m ²)	Renovação de Ar	Taxa de Ocupação (Pessoas/m ²)
ESCRITÓRIO	4,9	16,2	0,0025 m ³ /s.pessoa	0.14
SALA	4,9	10,2	0,0035 m ³ /s.pessoa	0.5
BANHEIRO	4,9	0	0,0049 m ³ /s.m ²	0
CORREDOR	4,9	0	-	0
ÁREAS DE CIRCULAÇÃO	4,9	0	0,0075 m ³ /s.pessoa	0.1
LABORÁTÓRIO	4,9	21,5	0,0086 m ³ /s.pessoa	0.25
ESCADAS	4,9	0	m ³ /s.pessoa	0
AUDITÓRIO	4,9	5,4	0,0027 m ³ /s.pessoa	1.2
DEPÓSITO	4,9	5,4	0,0006 m ³ /s.m ²	0

5.5 Cronogramas

O prédio foi programado para operar de 7 horas da manhã às 19 horas da noite durante os dias de semana. Isso significa dizer que durante este período o edifício terá uma porcentagem de equipamentos e iluminação em funcionamento e uma porcentagem de ocupantes. Aos fins de semanas e feriados o prédio estará fechado. A tabela abaixo apresenta o cronograma de uso utilizado para efeitos de simulação energética.

Tabela 5.6 - Cronograma de uso do edifício.

Horário	Nível (%)
00:00 - 7:00	0
7:00-8:00	20
8:00 - 19:00	100
18:00 -19:00	20
19:00-00:00	0

Conforme a tabela acima, no período de 7am a 8am o edifício encontra-se com 20% de seus ocupantes e apenas 20% de seus equipamentos e iluminação estão sendo utilizados.

6 ANÁLISE PRELIMINAR

Este capítulo apresenta uma análise preliminar do comportamento térmico do edifício visando identificar as zonas térmicas e suas características.

6.1 Metodologia

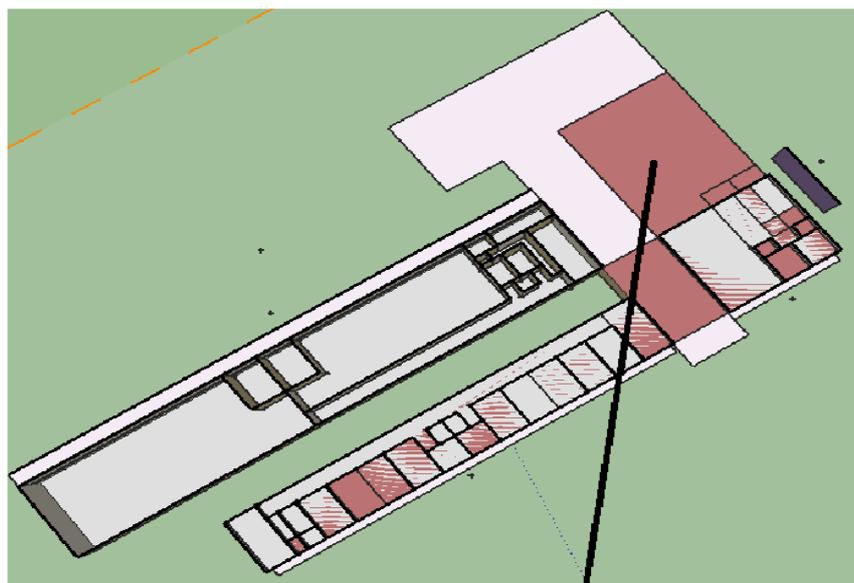
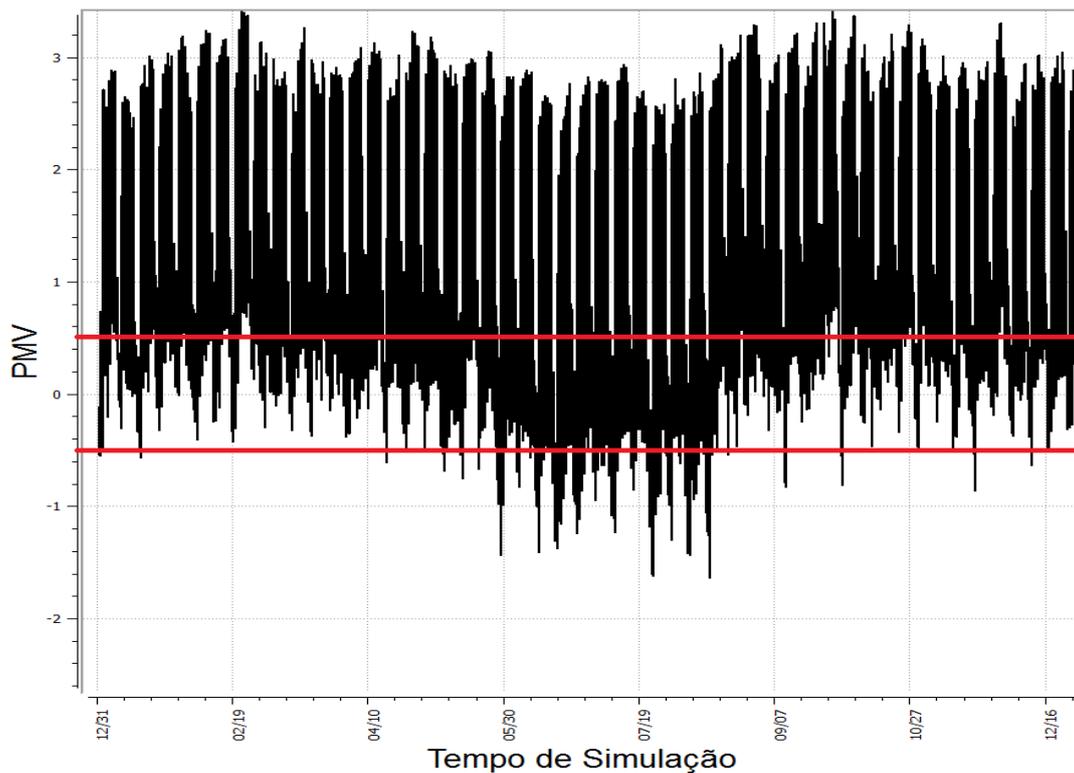
O conceito de conforto térmico pode ser muito bem mensurado por dois índices: o Voto Predito Médio (PMV) e da Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD), ambos especificados pela norma *ANSI/ASHRAE Standard 55-2004*. O primeiro índice leva em consideração aspectos relacionados ao indivíduo e fatores ambientais. A norma diz que para condições de conforto aceitáveis, o índice PMV deve ser mantido entre -0,5 e 0,5 nas horas de ocupação do edifício. Em termos práticos, segundo o PPD, isso significa que no máximo 10% dos ocupantes de um dado ambiente estariam insatisfeitos com as condições térmicas do mesmo, seja esse desconforto por calor ($PMV > 0,5$) ou por frio ($PMV < -0,5$).

O presente relatório apresentará um o perfil anual do índice PMV de alguns ambientes representativos do edifício, em evolução livre. Para que o programa *Energyplus* calcule esse índice alguns fatores devem ser definidos. Sendo assim, adotou-se valores de $Clo = 1$ (fator relativo à vestimenta utilizada pelo indivíduo) e $MET = 1,1$ (fator relativo a atividade desenvolvida por cada indivíduo) e a velocidade do ar considerada foi de 0,3 m/s.

6.2 Resultados em evolução livre

Visando trazer ao relatório uma visão geral do comportamento térmico do edifício em evolução livre serão apresentados ambientes representativos de cada bloco. Esta estratégia de análise se justifica pelo fato do edifício ter sido concebido com blocos que possuem um perfil de uso específico, além do fato dos ambientes com o mesmo tipo de uso estarem posicionados ao longo da mesma fachada de cada bloco.

As Figura 6.1 e Figura 6.2 apresentam respectivamente o perfil de PMV para dois ambientes localizados no Bloco Público.

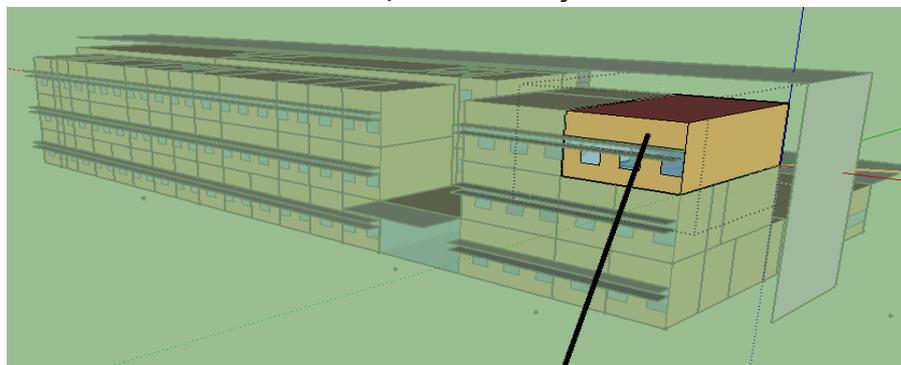
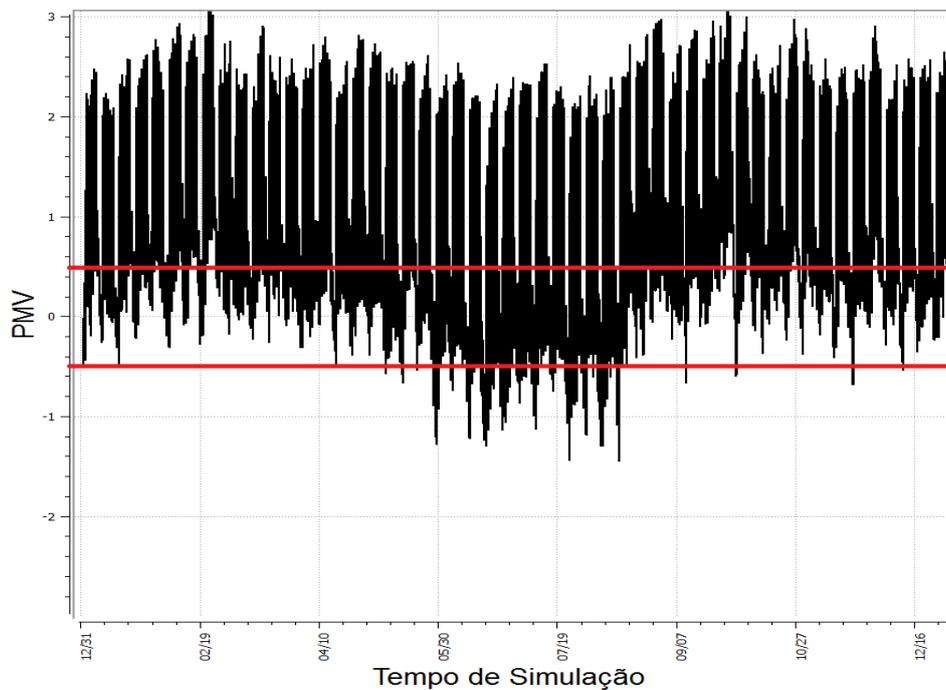


AUDITÓRIO_BLOCO PÚBLICO_TÉRREO

Figura 6.1 - Índice de PMV para o auditório localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da sala de Multiuso do Bloco Público:

- 5904 horas de desconforto térmico por calor;
- 634 horas de desconforto térmico por frio;
- 2222 de conforto térmico;



SALA MULTIUSO GRANDE_2º PAVIMENTO

Figura 6.2 -Índice de PMV para a Sala Multiuso localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da sala de Multiuso do Bloco Público:

- 5551 horas de desconforto térmico por calor;
- 692 horas de desconforto térmico por frio;
- 2517 de conforto térmico;

Note que apesar de estarem localizados no mesmo bloco, os dois ambientes acima apresentam um perfil de PMV diferenciado, apresentando valores máximos de PMV igual a 3, para o auditório, e 2,5 para a Sala Multiuso. Isso ocorre devido ao diferente posicionamento dos ambientes em relação à trajetória do sol. A Sala Multiuso recebe a incidência matutina do sol, enquanto que o Auditório

recebe a insolação vespertina. Seguindo como referencia o intervalo de PMV entre -0,5 e 0,5, pode-se concluir que os índices de PMV para o ambiente da Sala Multiuso são melhores que os apresentados pelo Auditório, onde em certos momentos este índice chega a valer 3. Por outro lado, note que nos meses de junho a agosto os índices PMV para ambos os ambientes se enquadram na faixa aceitável pela norma. Isso da primordialmente porque este é o período de inverno no Brasil.

As Figura 6.3 e Figura 6.4 abaixo apresentam o resultado do perfil de PMV para dois ambientes do Bloco de Escritório.

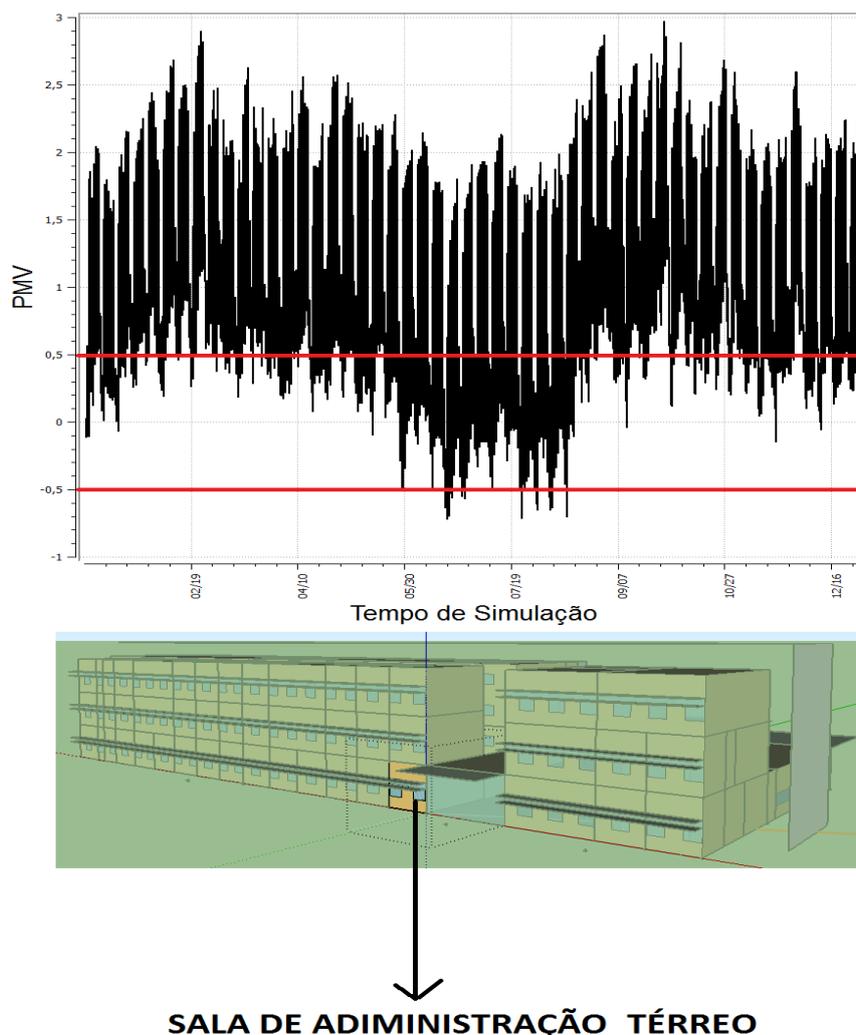


Figura 6.3 - Índice de PMV para Sala de Administração localizada no Bloco Escritórios.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Administração do Bloco de Escritórios:

- 6700 horas de desconforto térmico por calor;
- 203 horas de desconforto térmico por frio;
- 1857 de conforto térmico;

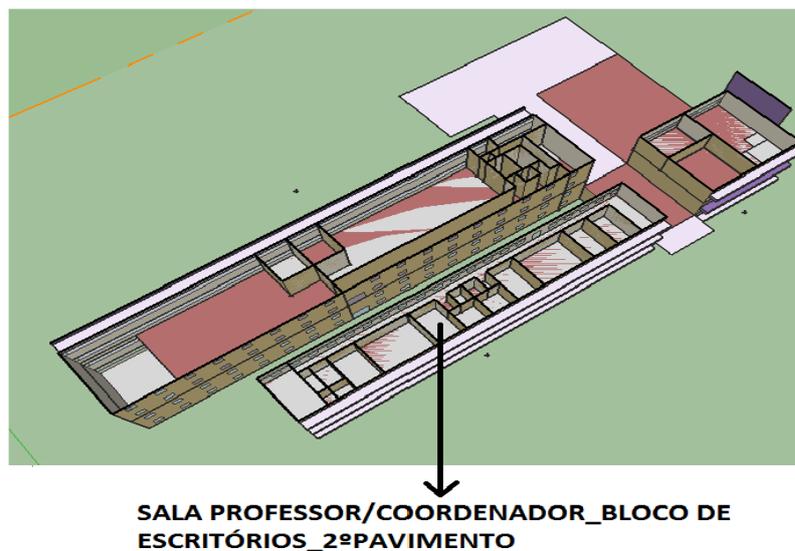
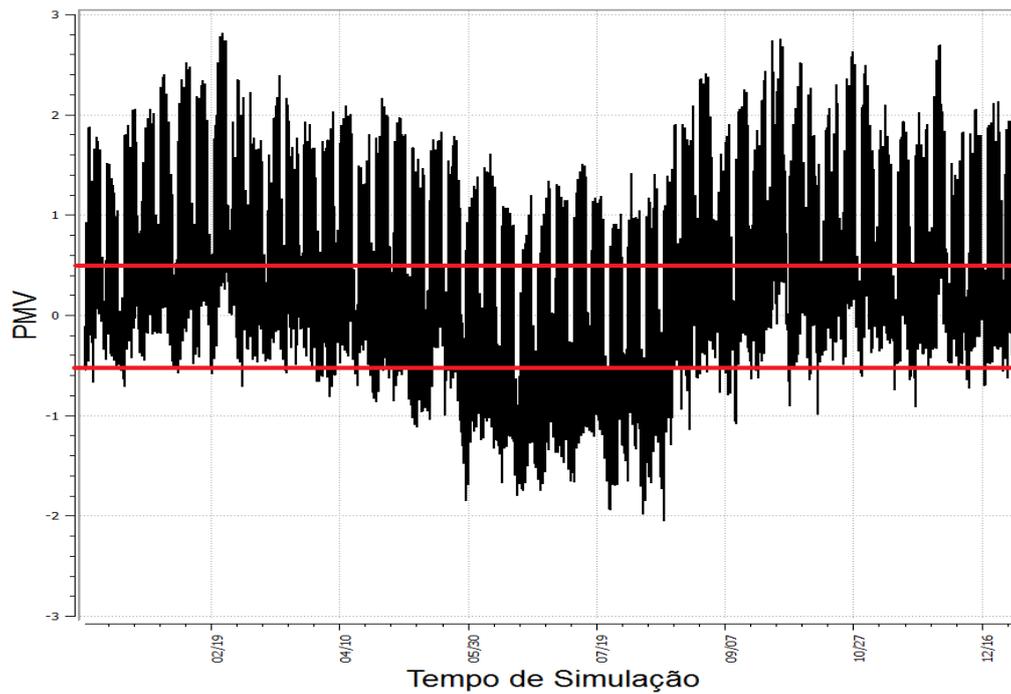


Figura 6.4 - Índice de PMV para Sala de Professor/Coordenador localizada no Bloco Escritórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Professor/Coordenador do Bloco de Escritórios:

- 6700 horas de desconforto térmico por calor;
- 203 horas de desconforto térmico por frio;
- 1857 de conforto térmico;

Os perfis de PMV se apresentaram mais aceitáveis se comparado aos perfis apresentados nos ambientes do Bloco Público (mais próximos dos valores aceitáveis por norma), apresentando valores máximos a 2,5 para a Sala Administrativa e 1,5 para o corredor desse bloco. No caso da Sala Administrativa a incidência solar se dá no período matutino, enquanto que, no corredor essa incidência é vespertina. O mesmo comportamento observado nos meses de inverno para os ambientes do Bloco Público pode ser aplicado ao Bloco de Escritórios.

As Figura 6.5 e Figura 6.6 apresentam os resultados de perfil de PMV anual para dois ambientes do bloco de Laboratório.

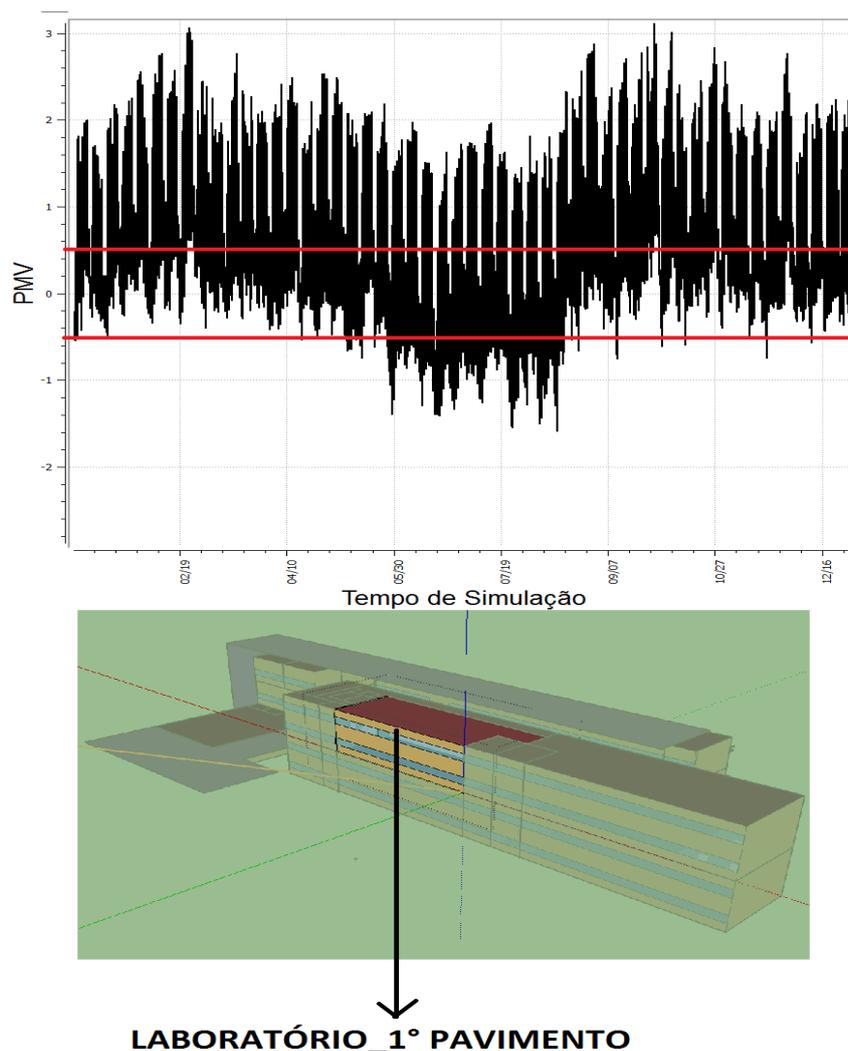


Figura 6.5 - Índice de PMV do Laboratório localizada no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 4609 horas de desconforto térmico por calor;
- 1122 horas de desconforto térmico por frio;
- 3029 de conforto térmico;

Os laboratórios desse bloco apresentaram valores de PMV igual a 3. Note ainda que o padrão de comportamento no período de inverno se repete para esse bloco: neste período as condições de conforto são obtidas para algumas horas do dia

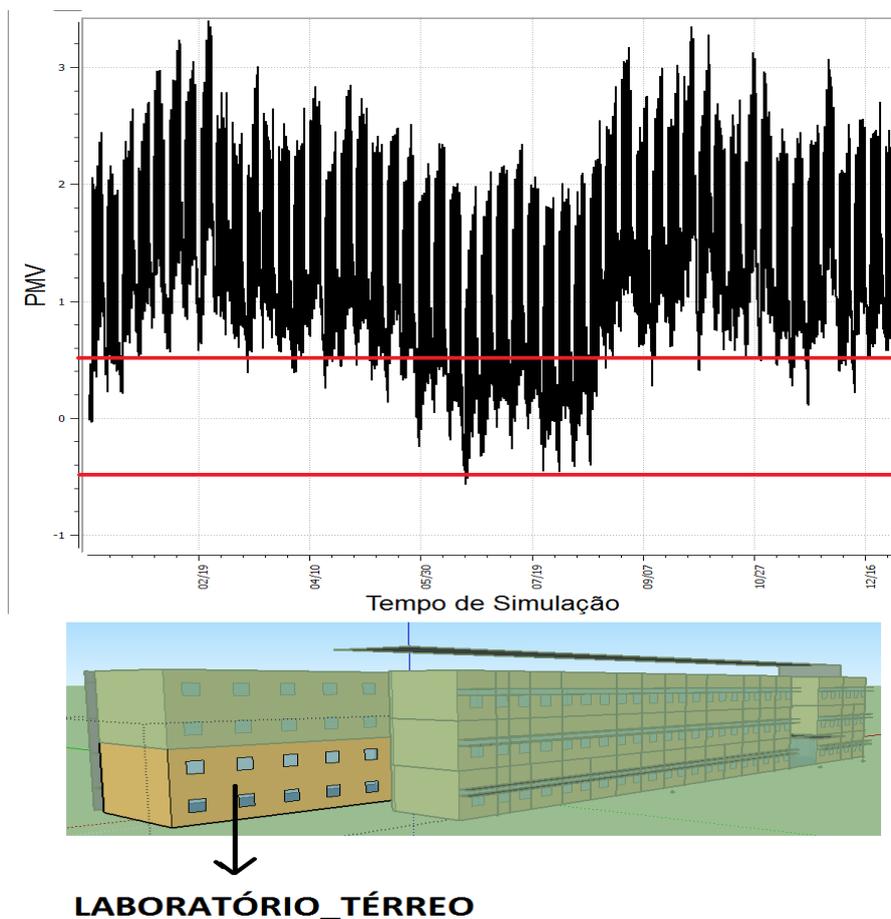


Figura 6.6 - Índice de PMV do Laboratório localizada no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 7597 horas de desconforto térmico por calor;
- 86 horas de desconforto térmico por frio;
- 1077 de conforto térmico;

Em teoria, os ambientes da fachada do Bloco de Laboratório e o Auditório deveriam apresentar os piores índices de PMV, uma vez que devido ao posicionamento do prédio esta fachada receberia o sol vespertino. Isso justifica o esforço da equipa da FAU em projetar mecanismos que gerem sombra ou atenuem a incidência solar sobre essas fachadas como pode ser visto na Figura 6.7.

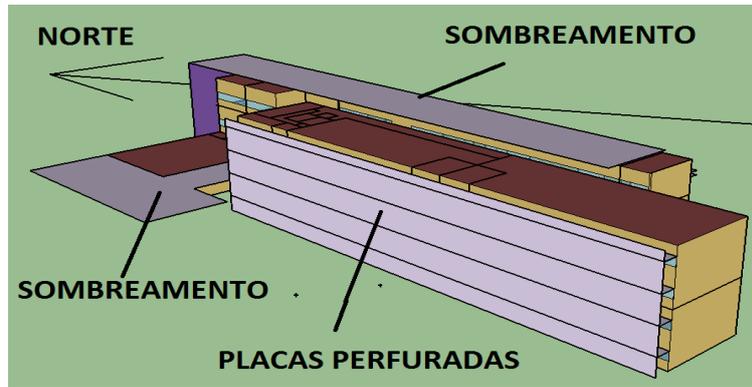


Figura 6.7 - Superfícies de sombreamento utilizadas no nZEB.

Foram empregadas *overhangs* sobre as janelas do auditório e do Bloco de Laboratório além de placas perfuradas posicionadas logo a frente da fachada do Bloco de Laboratórios. Note ainda o posicionamento de uma superfície opaca exatamente sobre o edifício. Esta superfície tem como função principal atenuar os efeitos do sol a pino. Esse é um dos motivos que fez com que os ambientes localizados na região sobre a qual está extensão de sombreamento foi posicionada, Figura 6.8, apresentassem os melhores índices de PMV.

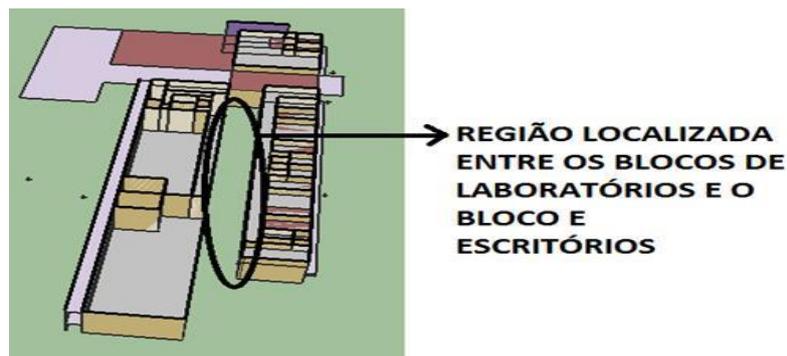


Figura 6.8 - Região sombreada por uma superfície opaca.

Em linhas gerais o nota-se a necessidade do uso de climatização ativa nos ambientes pelo fato destes apresentarem valores de PMV fora da faixa de valor aceitável por norma.

6.3 Simulação da carga térmica

6.3.1 Zoneamento térmico

Para se realizar um zoneamento de forma adequada deve-se seguir algumas recomendações da norma *ASHRAE 90.1*, mais especificamente o apêndice G desta norma. Em linhas gerais, em um zoneamento ideal, cada ambiente é uma zona térmica. Entretanto a norma supracitada orienta que os ambientes sejam agrupados segundo critérios de posicionamento em relação às fachadas e o seu tipo de

uso. Isso diminuirá o tempo de simulação além de facilitar a análise de resultados. A figura 6.9 apresenta o zoneamento térmico estabelecido para o edifício *nZEB*.

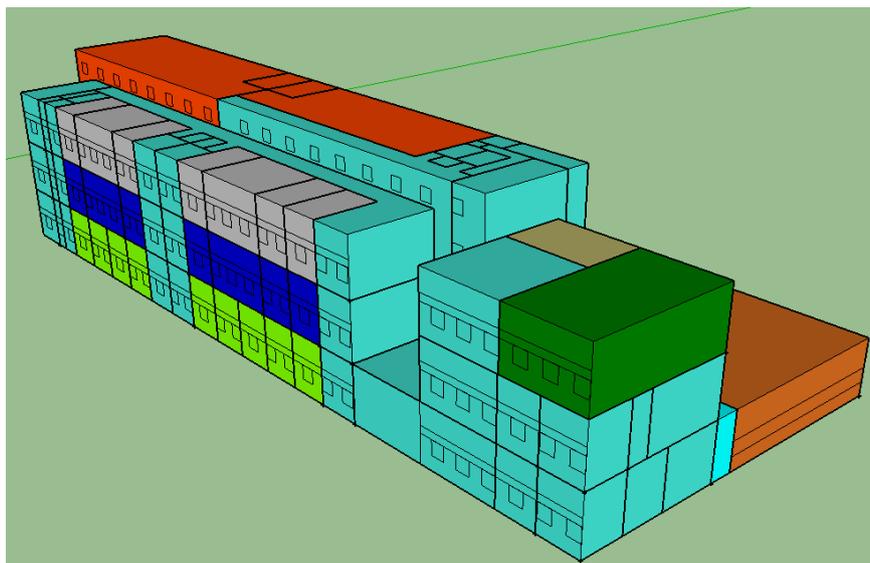


Figura 6.9 - Zoneamento térmico do edifício *nZEB*.

Nesta figura, ambientes com as mesmas cores constituem ambientes de uma zona térmica. Os ambientes em azul claro não foram integrados a nenhuma zona térmica visto que são ambientes que não serão climatizados.

6.3.2 Carga térmica

Após a análise do conforto térmico nos ambientes do edifício em evolução livre verificou-se a necessidade de adotar um sistema de climatização ativa. Para tanto, deve-se em primeiro lugar calcular a carga térmica do edifício, e só então poderá se propor soluções que visem atender o conforto térmico nos ambientes do edifício.

Foi adotado um valor de 23°C como limite para condições de conforto térmico. Em geral, esse valor leva a um PMV próximo de 0,5. Caso, o PMV esteja muito longe do valor de 0,5 deve-se adotar um novo limite de temperatura. O cálculo de carga térmica não levou em consideração os seguintes ambientes: banheiros, corredores, escadas entre outros, visto que os mesmos não serão climatizados.

6.3.3 Resultados

O resultado do modelo simulado mostrou um pico de carga térmica de 282,52 kW (80,10 TR). Se comparado ao modelo desenvolvido no trabalho de Pinto (2014), a carga térmica é 2,5% menor, um valor pouco expressivo. A Tabela 6.1 traz um resumo da carga térmica por bloco.

Tabela 6.1- Resultado de carga térmica por blocos.

Bloco	Carga Térmica (TR)
Laboratórios	24,75
Escritórios e Administração	26,25
Público	29,10
Total	80,10

Note que como avaliado pelo PMV, os ambientes do Bloco de escritórios apresentaram a menor carga de todo o sistema. Por outro lado, o Bloco Público foi o Bloco com maior carga térmica.

7 SOLUÇÕES ATIVAS DE CLIMATIZAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as propostas de soluções ativas de climatização para o edifício nZEB.

7.1 Objetivo

Este capítulo tem como objetivo apresentar as propostas de climatização ativa e seus resultados em termos de consumo energético e nível de conforto térmico gerado pela solução adotada. A estratégia a ser adotada em busca de um sistema que atenda as necessidades do edifício é começar a análise por soluções de menor gasto energético. À medida que uma solução de menor consumo energético não for suficiente para gerar os devidos níveis de conforto térmico exigidos por norma, uma solução que gaste mais energia deverá ser empregada. Assim, o ponto ótimo de cada solução será avaliado, visando ao final das análises a proposição de uma solução híbrida que atenda as condições de projeto com o menor consumo energético possível.

Dois tipos de resultados serão apresentados: o primeiro deles referentes ao consumo energético do edifício considerando uma solução de climatização ativa e o segundo considerando os resultados relativos ao conforto térmico obtido com cada solução proposta.

Com relação ao consumo energético, será mostrado um consumo mensal da edificação ao longo de um ano típico. Além disso, será apresentado um discriminação do consumo no edifício por componentes (iluminação, climatização e equipamentos). Por último, o consumo total será comparado aos valores apresentados na tabela abaixo, dados estes extraídos do trabalho de Pinto (2014), onde o autor fez uma relação entre o consumo anual por área construída de várias edificações existentes no mundo. Nesta tabela está incluído ainda, o resultado final de consumo energético em kWh/m².ano da proposta de edificação nZEB apresentada em seu trabalho.

Tabela 7.1 - Consumo de energia por área de diversos edifícios. (Pinto, 2014)

Edifício	Média do consumo energético (kWh/m ² .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 (Pinto,2014)	48,54

Note que os resultados apresentados na tabela acima se encontram dispostos em ordem decrescente. Note ainda que a proposta analisada no trabalho de Pinto (2014) apresentou a menor relação consumo/área.

Quanto aos resultados referentes ao perfil de PMV, estes serão apresentados para o período de um ano típico de projeto. Os resultados de PMV para as soluções ativas estudadas serão exibidos em um gráfico, onde também foi plotado os resultados de PMV considerando os ambientes em evolução livre. Essa abordagem permitira avaliar a efetividade do sistema implementado, face ao comportamento do mesmo sem climatização.

7.2 Ventilação forçada

A ventilação forçada ou mecânica é produzida a partir de equipamentos como exaustores e ventiladores. Esse tipo de solução é empregado em casos onde as condições naturais de ventilação não proporcionam adequada movimentação do ar. Esse tipo de sistema permite o tratamento do ar, realizando processos de filtragem e distribuição uniforme do mesmo nos ambientes onde se deseja. O controle do processo ocorre através do correto dimensionamento de dutos e ventiladores. A Figura 7.1 abaixo apresenta um esquema de um sistema de ventilação mecânica.

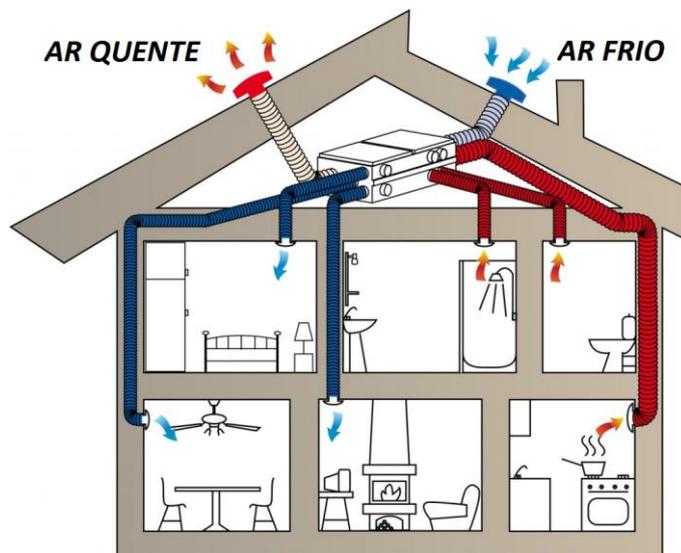


Figura 7.1 - Funcionamento esquemático de um sistema com ventilação mecânica.

No esquema acima, as setas indicam a movimentação de ar pelas zonas térmicas. Essa movimentação pode ser induzida de duas maneiras:

- Por exaustão ou pressão negativa;
- Por pressurização ou pressão positiva;

7.2.1 Simulação

Visando simular o sistema de ventilação mecânica no edifício foi modelado uma planta de ar como mostra a Figura 7.2.

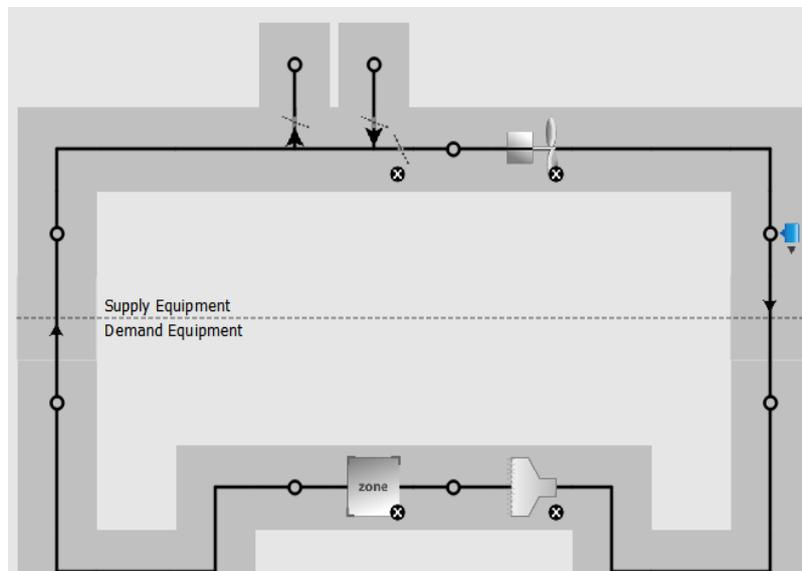


Figura 7.2- Modelagem da planta de ar para o sistema de ventilação forçada.

Os componentes utilizados na modelagem são apresentados na Tabela 7.2 abaixo.

Tabela 7.2 - Componentes utilizados no sistema de ventilação forçada.

	Ventilador com vazão constante
	Termostato para o ar
	Terminal de ar sem reaquecimento
	Zona térmica climatizada
	Tomada de ar externo (saída e entrada de ar)

Como pode ser observado foi utilizado um ventilador para induzir a entrada de ar no sistema. O ventilador foram modelados com uma eficiência de 70%, com uma pressão estática de 500 Pa. Cada pavimento contará com um sistema de duto responsável por distribuir o ar induzido pelo ventilador e outra rede de dutos responsável por promover a renovação de ar.

7.2.2 Resultados

A Figura 7.3 apresenta o consumo energético anual total do edifício *nZEB* e do seu sistema de climatização por ventilação forçada.

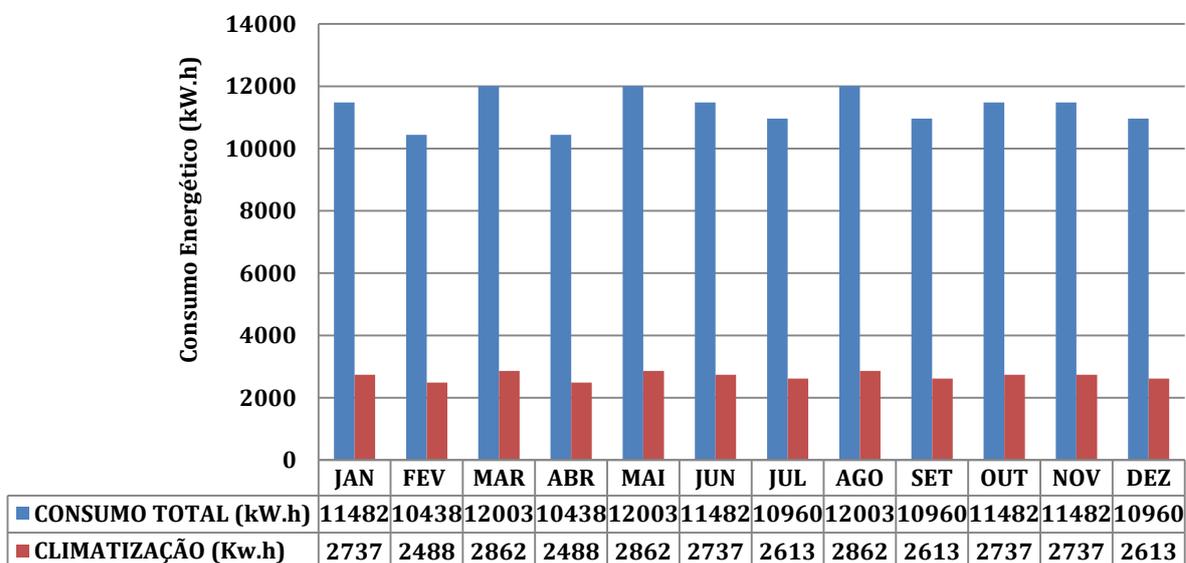


Figura 7.3 - Consumo energético do edifício *nZEB* utilizado ventilação forçada.

O consumo total anual do edifício *nZEB* climatizado apenas com um sistema de ventilação forçada foi de 135.693 kWh. O consumo do sistema de climatização representa 24% desse consumo total, um valor absoluto de 32.349 kWh. A Figura 7.4 apresenta um gráfico que exhibe o consumo energético do edifício discriminado por componente. Note que a maior parcela em termos de consumo é relativa ao uso de equipamentos internos.

■ CLIMATIZAÇÃO ■ ILUMINAÇÃO
■ EQUIPAMENTOS

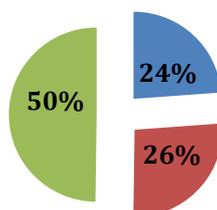


Figura 7.4 - Consumo energético por componente.

O sistema de climatização apresentou um valor de consumo anual por metro quadrado de 58 kWh/m².ano. Apesar do baixo consumo, se comparado aos dados da Tabela 7.1 - Consumo de energia por área de diversos edifícios. (Pinto, 2014), o sistema não consegue atender as expectativas de

conforto térmico segundo recomenda a norma *ASHRAE 55.1*. Para comprovar tal afirmação será apresentado nas figuras a seguir o perfil de PMV para 6 ambientes. A Figura 7.5 e a Figura 7.6 apresenta os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco Público considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

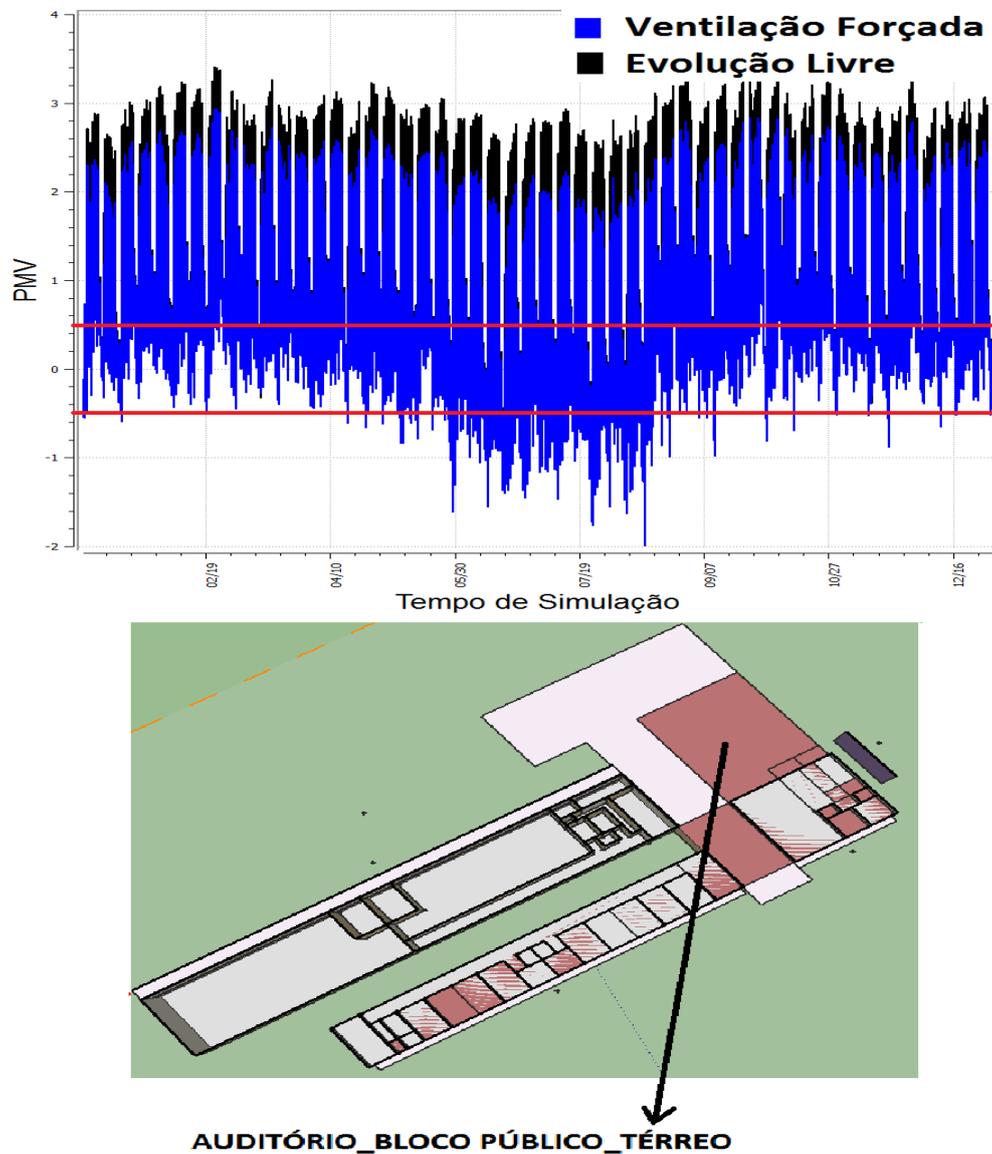
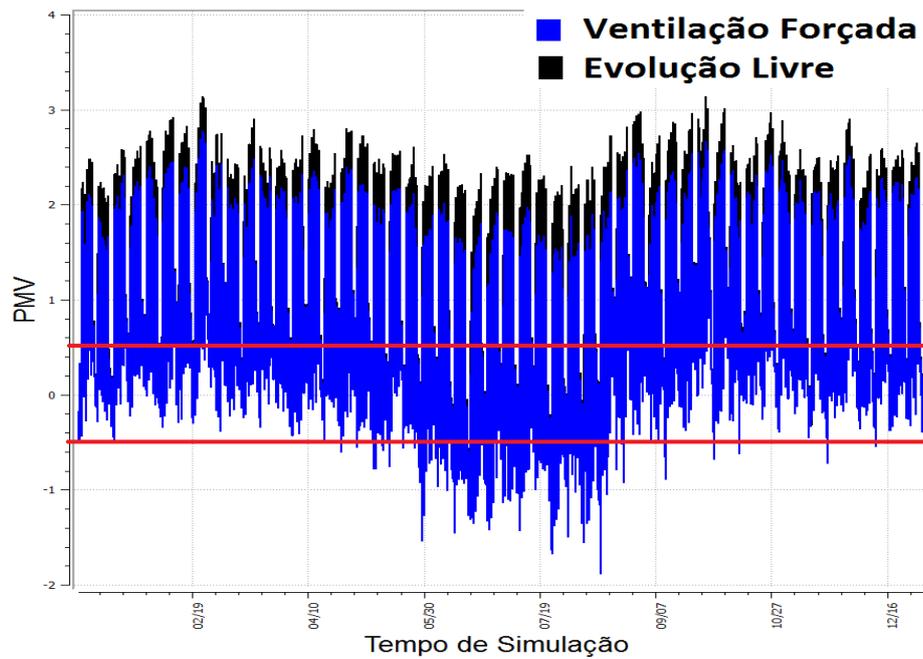


Figura 7.5 - Perfil de PMV do Auditório Localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 5587 horas de desconforto térmico por calor;
- 768 horas de desconforto térmico por frio;
- 2405 de conforto térmico;



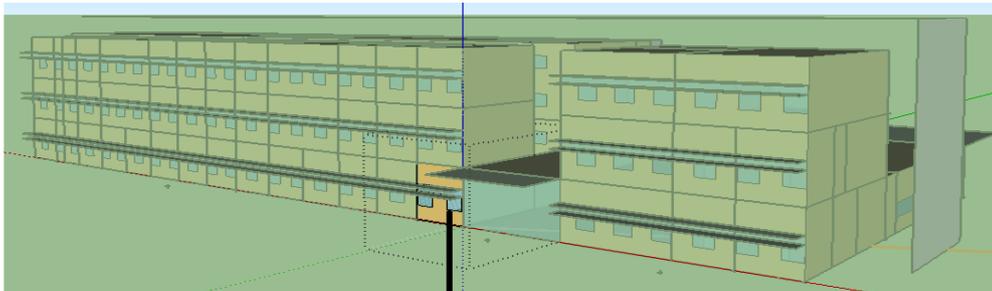
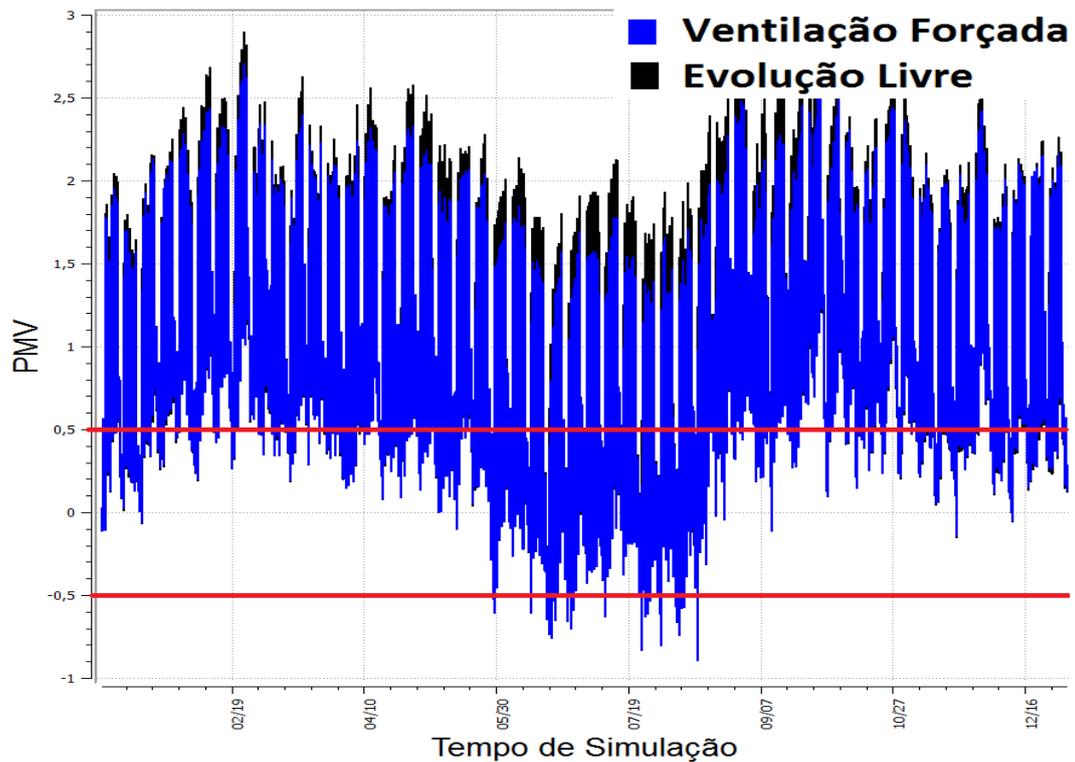
SALA MULTIUSO GRANDE_2º PAVIMENTO

Figura 7.6 - Perfil de PMV do Auditório Localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 5309 horas de desconforto térmico por calor;
- 796 horas de desconforto térmico por frio;
- 2655 horas de conforto térmico;

A Figura 7.7e a Figura 7.8apresenta os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Escritórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

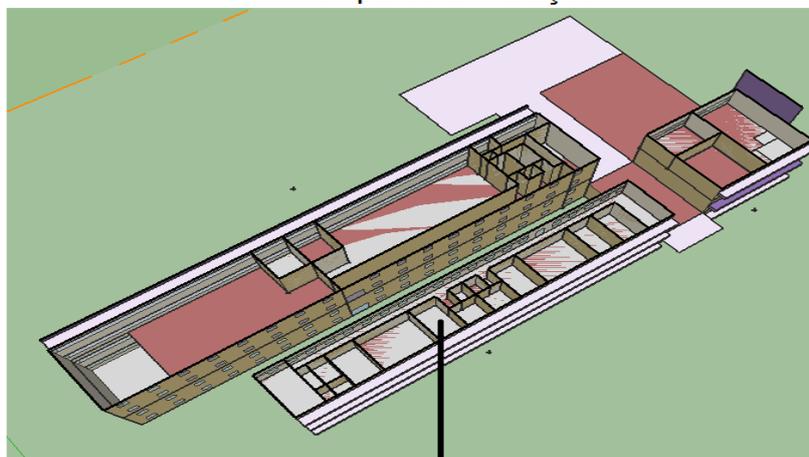
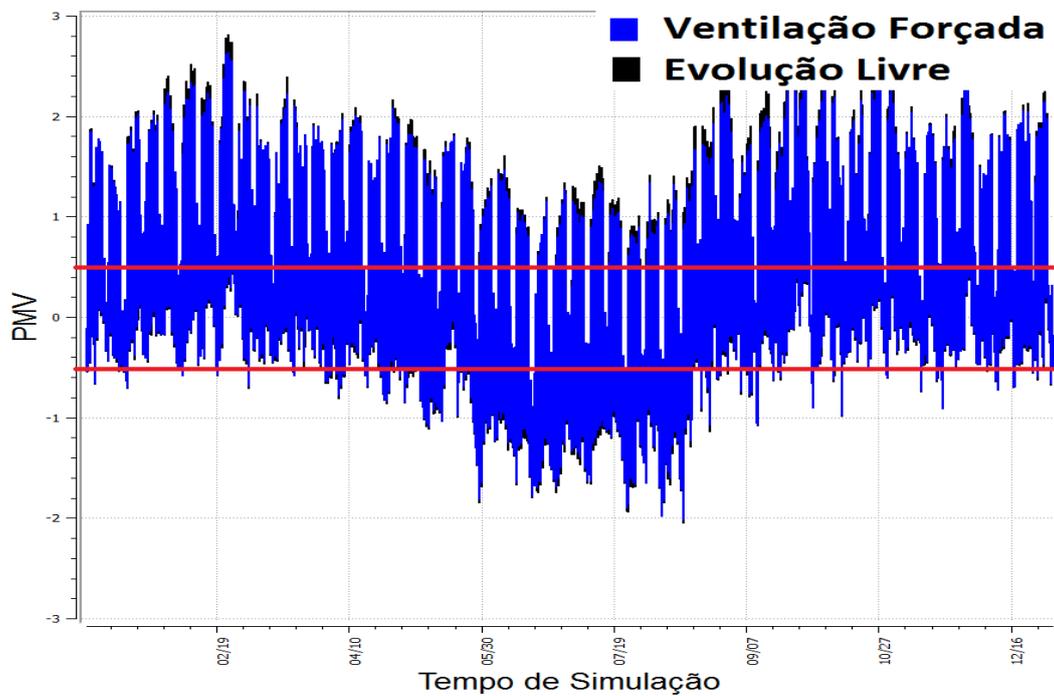


SALA DE ADIMINISTRAÇÃO_TÉRREO

Figura 7.7 - Índice de PMV para Sala de Administração localizada no Bloco Escritórios.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 6671 horas de desconforto térmico por calor;
- 223 horas de desconforto térmico por frio;
- 1866horas de conforto térmico;



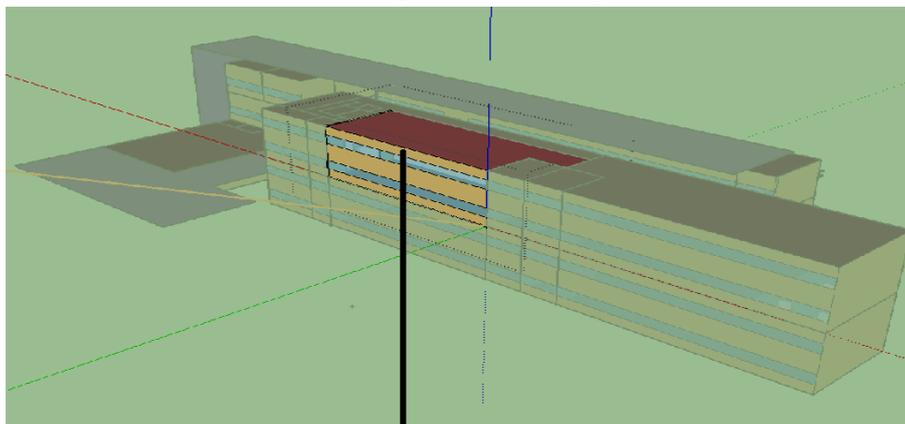
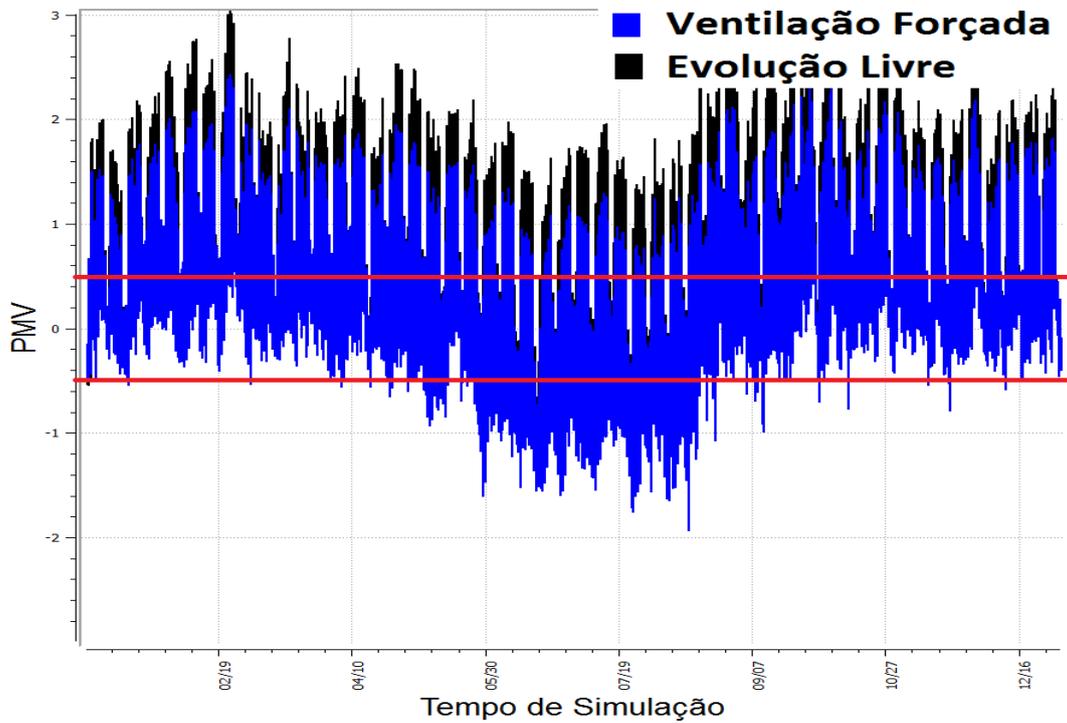
**SALA PROFESSOR/COORDENADOR_BLOCO DE
ESCRITÓRIOS_2ºPAVIMENTO**

Figura 7.8 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 4063 horas de desconforto térmico por calor;
- 1729 horas de desconforto térmico por frio;
- 2968 horas de conforto térmico;

A Figura 7.9 e a Figura 7.10 apresenta os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Laboratórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

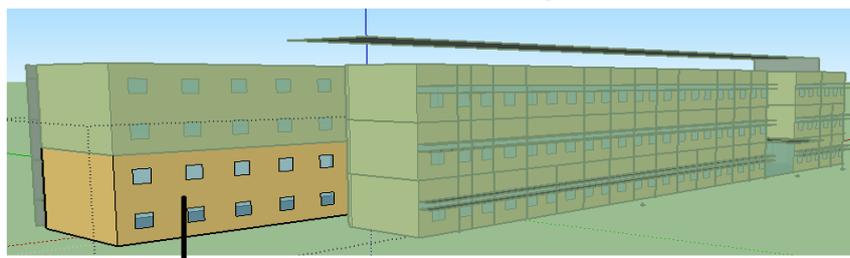
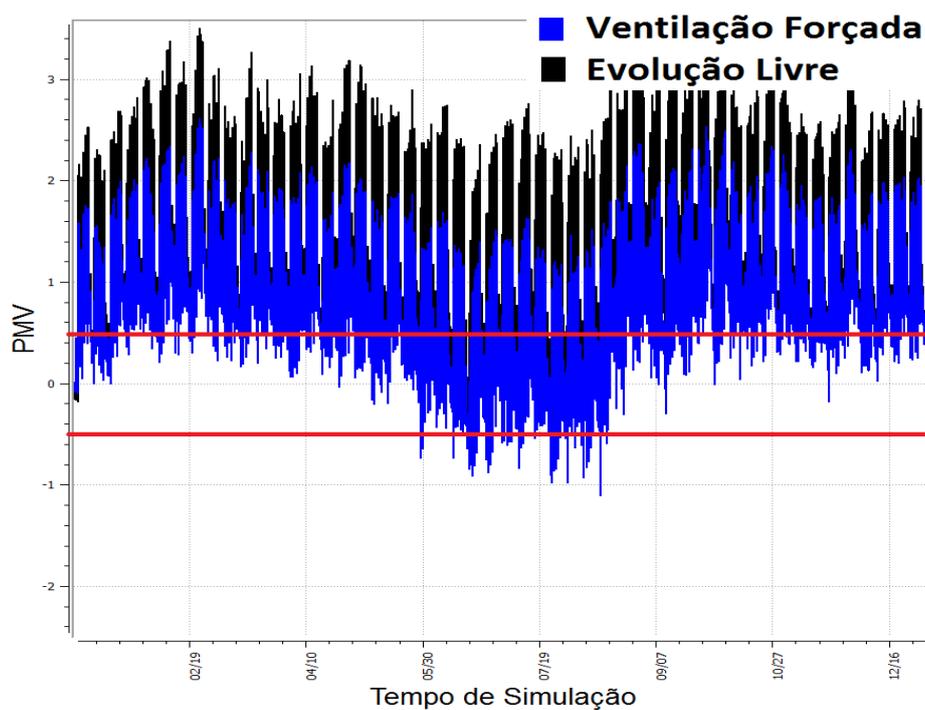


LABORATÓRIO_1º PAVIMENTO

Figura 7.9 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 3967 horas de desconforto térmico por calor;
- 1561 horas de desconforto térmico por frio;
- 3232 horas de conforto térmico;



LABORATÓRIO_TÉRREO

Figura 7.10 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco de Público:

- 6557 horas de desconforto térmico por calor;
- 267 horas de desconforto térmico por frio;
- 1396 horas de conforto térmico;

O sistema de ventilação forçada não foi capaz de oferecer conforto térmico na maior parte do tempo de simulação considerado. Os resultados apontam para o uso de um sistema de climatização mais efetivo, no sentido de garantir o conforto térmico dos ambientes. Em termos de conforto térmico, essa solução apresenta resultados bem similares aos obtidos em evolução livre. Uma ressalva para o bloco de Laboratórios, onde os resultados apresentaram uma melhora em termos de conforto térmico se comparado aos resultados obtidos em evolução livre. Essa é uma tendência já apresentado no

trabalho de Pinto 2014, onde os ambientes de laboratórios exigiram um menor esforço para serem adequadamente climatizados.

7.3 Resfriamento evaporativo

O tratamento do ar utilizando sistema de resfriamento evaporativo é uma metodologia ambientalmente correta e energeticamente eficiente em muitos casos. Nesse sistema, a água é utilizada como fluido de trabalho para realizar o tratamento do ar. O processo consiste na utilização da evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar induzido por um ventilador, provocando uma redução na temperatura do ar, como pode ser visto na Figura 7.11.



Figura 7.11 - Esquema do funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo.

Este processo apresenta maior eficiência quando as temperaturas entre o ar a ser tratado e o ar a ser insuflado no ambiente são mais elevadas, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para o conforto humano. Um dos benefícios desse método é o aumento da umidade do ar, fator importantíssimo, especialmente em regiões secas como a região centro-oeste do Brasil.

O sistema evaporativo modelado no *EnergyPlus* simula o comportamento 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, retirando calor do mesmo. 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. A eficiência do painel evaporativo (ε) foi definida em 90% segundo equação abaixo:

$$\varepsilon = \frac{(T_{bs,saída} - T_{bs,entrada})}{T_{bs,entrada} - T_{bu,entrada}}$$

- $T_{bs,saída}$ – Temperatura de bulbo seco na saída do módulo evaporativo;
- $T_{bs,entrada}$ – Temperatura de bulbo seco na entrada do módulo evaporativo;
- $T_{bu,entrada}$ – Temperatura de bulbo umido na entrada do módulo evaporativo;

7.3.1 Simulação

Visando avaliar o sistema de Resfriamento evaporativo foi implementado no *software* de análise o seguinte modelo apresentado na figura 7.12.

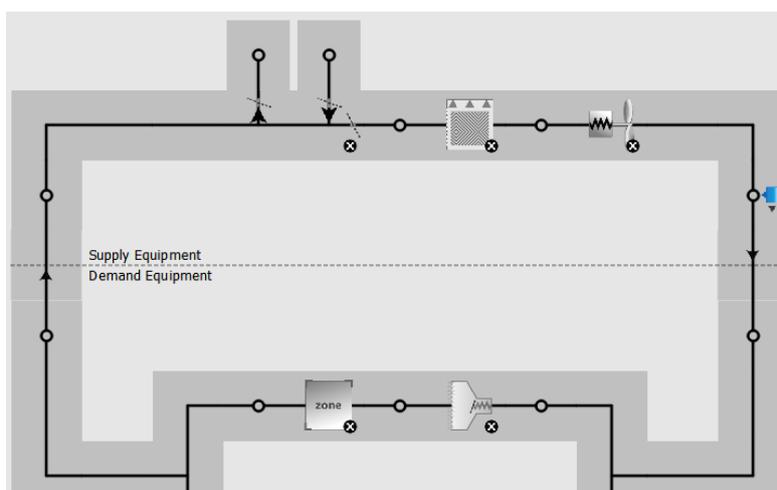


Figura 7.12 - Modelagem do Sistema de Resfriamento Evaporativo.

A tabela 7.2 apresenta uma descrição dos componentes utilizados na modelagem do sistema.

Tabela 7.3 - Elementos utilizados na modelagem do sistema de resfriamento evaporativo do ar.

	Ventilador com vazão constante
	Módulo de resfriamento evaporativo
	Termostato para o ar
	Terminal de ar sem reaquecimento
	Zona térmica climatizada
	Tomada de ar externo (saída e entrada de ar)

7.3.2 Resultados

A Figura 7.13 abaixo apresenta o consumo energético anual total do edifício nZEB quando o sistema de resfriamento evaporativo é adotado como solução de climatização. Além disso, o gráfico

traz informações a respeito do consumo energético referente a climatização ativa implementado no edifício.

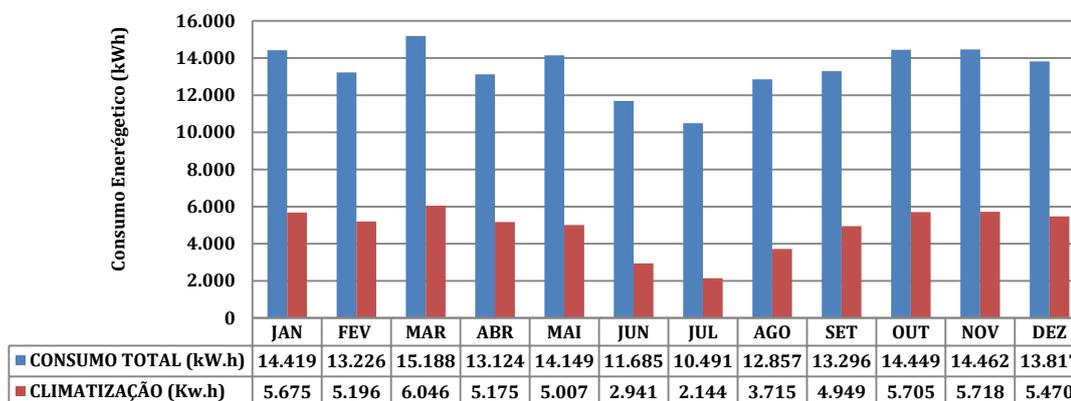


Figura 7.13 - Consumo energético anual do edifício nZEB.

O consumo total do edifício nZEB climatizado apenas com um sistema de resfriamento evaporativo foi de 161.168 kWh. O sistema de climatização representa 36% do consumo total, 57.741 kWh. A Figura 7.4 abaixo exibe o consumo energético do edifício discriminado por componentes.

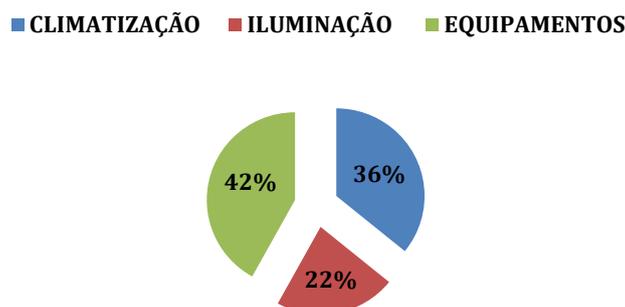


Figura 7.14 - Consumo energético por componente.

Comparado ao consumo do energético do edifício quando se considerou o sistema de ventilação forçada, este sistema apresentou um consumo 19% maior. Com relação à razão de consumo energético anual por metro quadrado, o resultado obtido com o uso do sistema evaporativo é maior que o considerando o sistema de ventilação forçada: 68,85 kWh/m².ano. No entanto, com o sistema de ventilação forçada não se obteve conforto térmico para os ambientes.

A sequência de figuras que serão apresentados mostrarão os resultados do perfil de PMV para um ano típico de projeto para os mesmos seis ambientes apresentados na seção de resultados do capítulo referente ao uso de ventilação forçada. Como será constado a diante, diferentemente do sistema empregando apenas ventilação forçada, o sistema de climatização por resfriamento evaporativo apresenta um potencial bem mais elevado.

Nos gráficos as curvas em azul representam o perfil de PMV utilizando como solução de climatização o sistema de resfriamento evaporativo, enquanto que a curva em preto apresenta resultados referentes ao sistema em evolução livre.

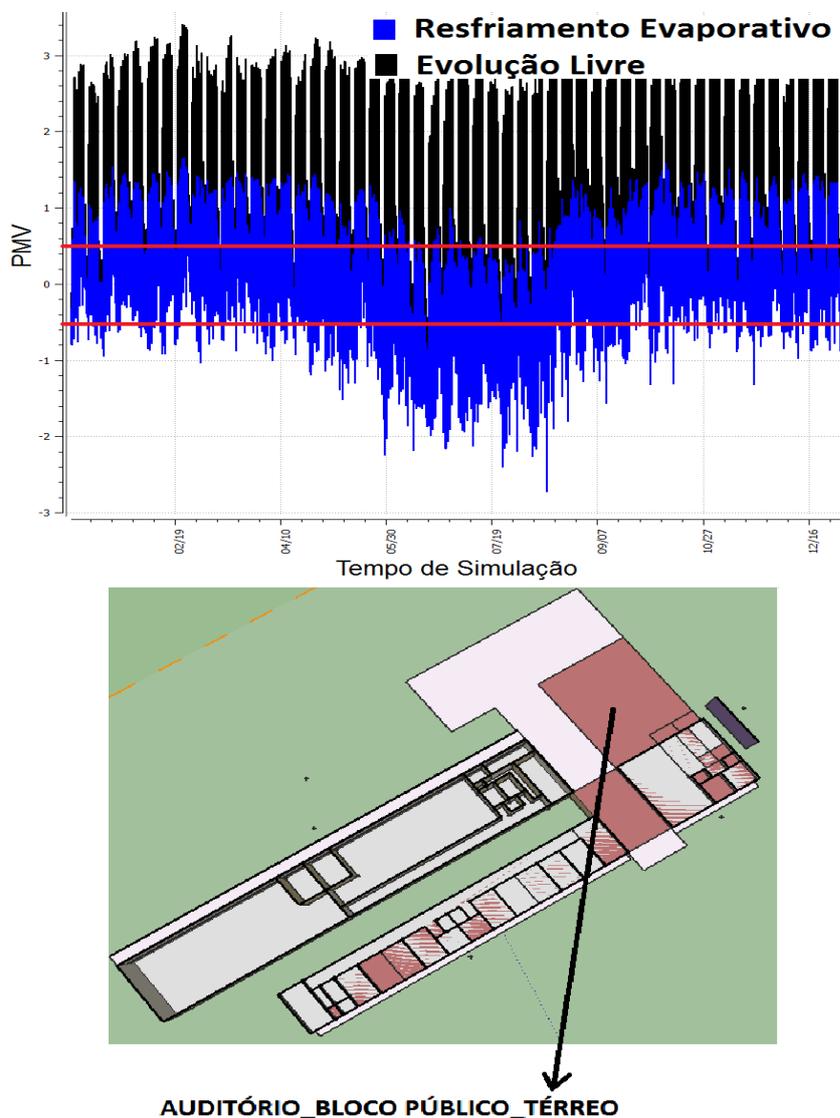


Figura 7.15 - Perfil de PMV para um dia típico de projeto para o Auditório localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco Público:

- 3048 horas de desconforto térmico por calor;
- 1828 horas de desconforto térmico por frio;
- 3884 horas de conforto térmico;

A Figura 7.16 e Figura 7.17 apresentam os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Escritórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

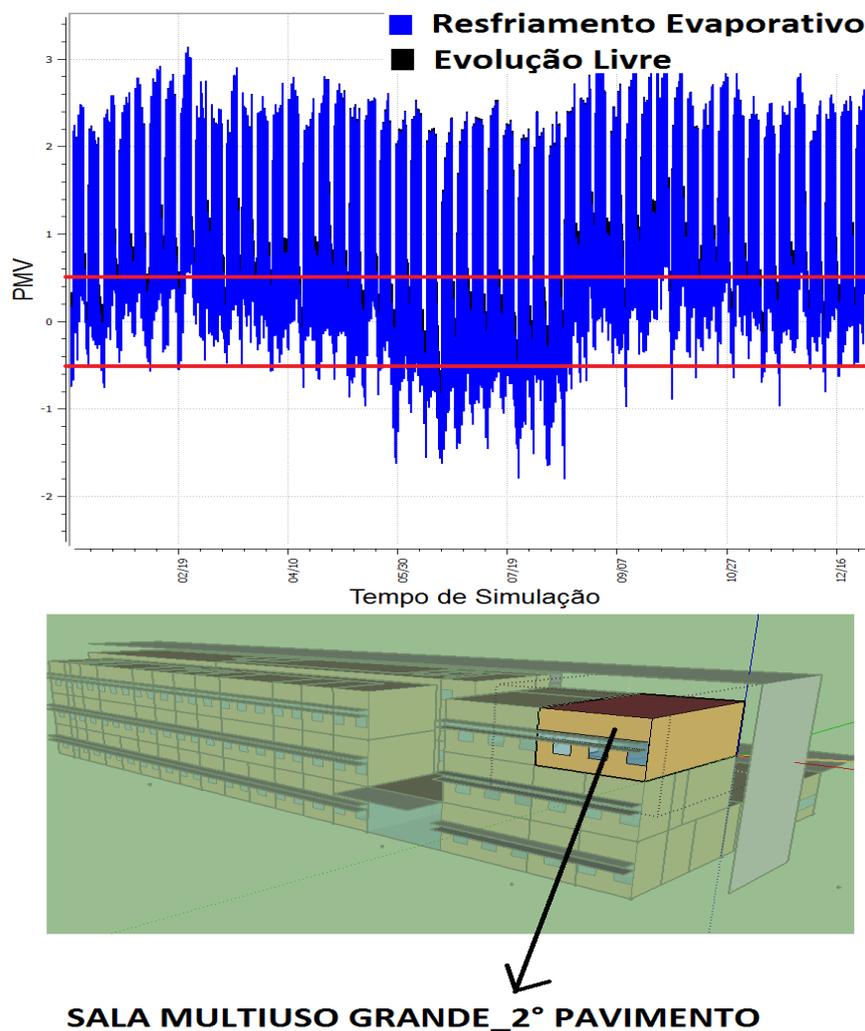


Figura 7.16 - Perfil de PMV para a Sala de multiuso do Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados de conforto térmico para da Sala Multiuso, localizada no Bloco de Escritórios:

- 4413 horas de desconforto térmico por calor;
- 1123 horas de desconforto térmico por frio;
- 3224 horas de conforto térmico;

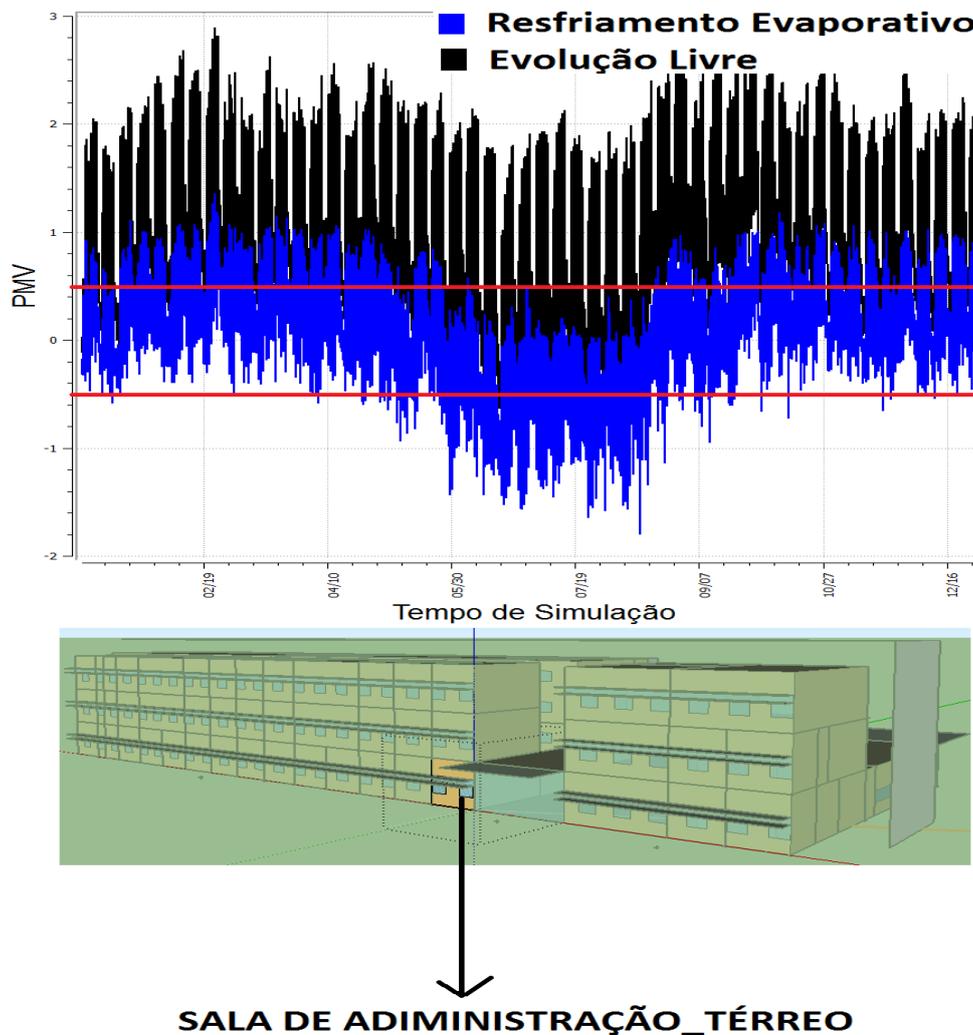
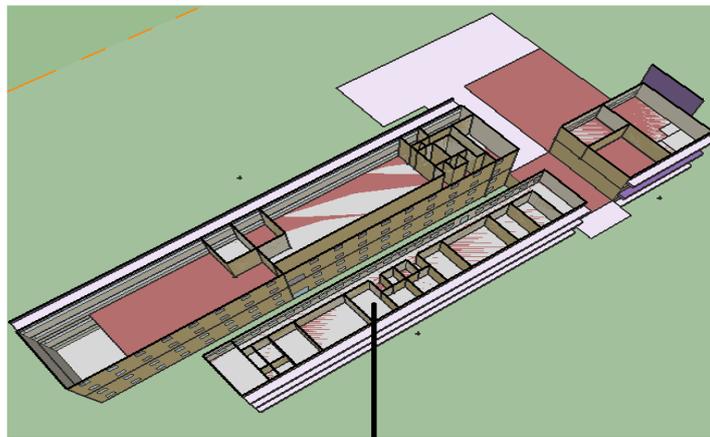
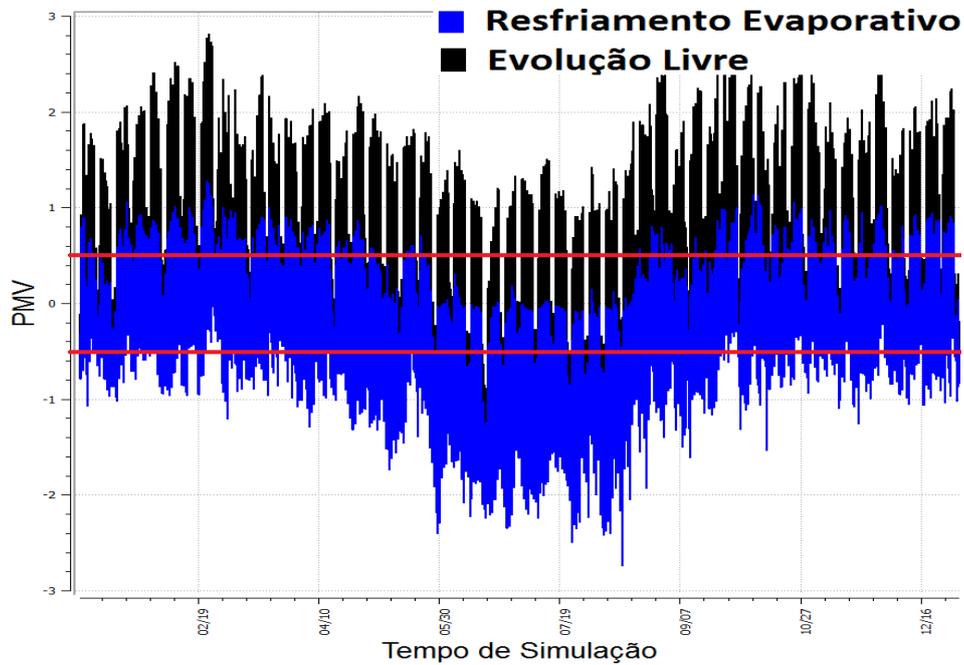


Figura 7.17 - Perfil de PMV da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios:

- 2643 horas de desconforto térmico por calor;
- 1821 horas de desconforto térmico por frio;
- 4296 horas de conforto térmico;



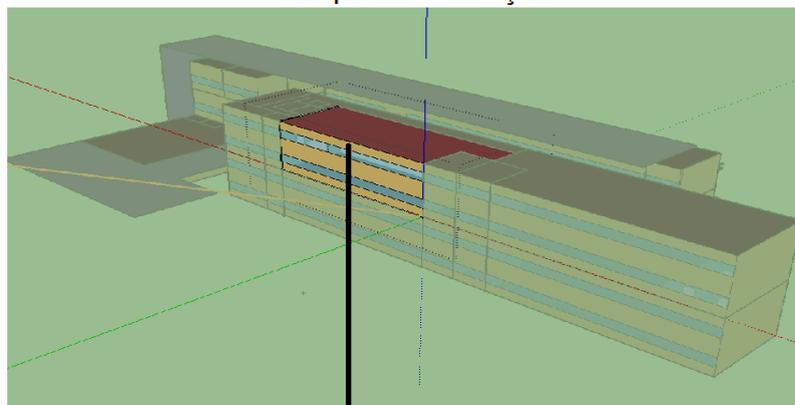
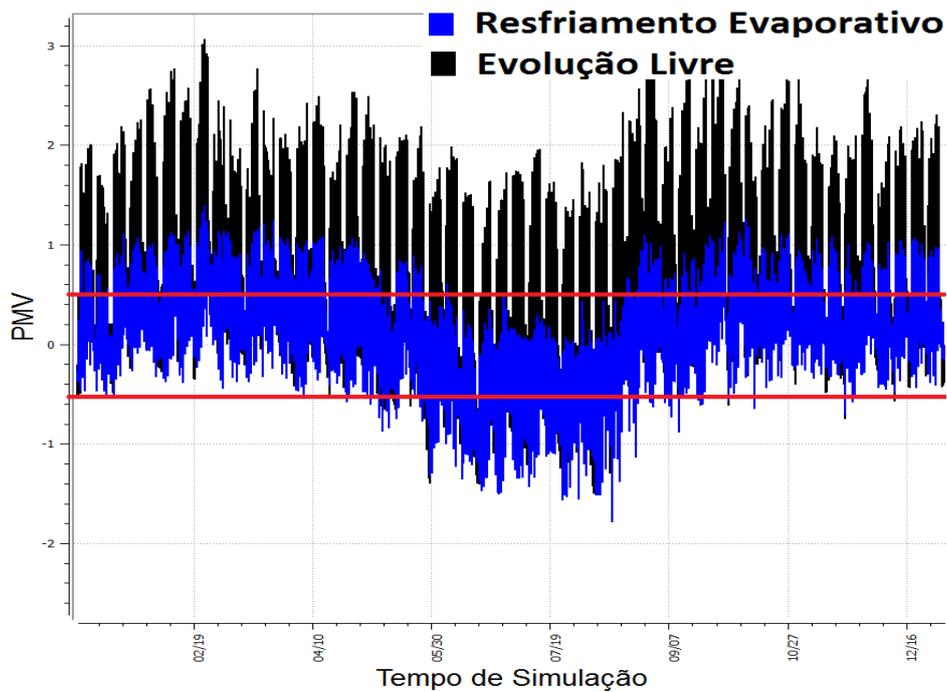
**SALA PROFESSOR/COORDENADOR_BLOCO DE
ESCRITÓRIOS_2ºPAVIMENTO**

Figura 7.18 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios:

- 1334 horas de desconforto térmico por calor;
- 3522 horas de desconforto térmico por frio;
- 3904 horas de conforto térmico;

A Figura 7.19 e a Figura 7.20 apresenta os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Laboratórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.



LABORATÓRIO_1º PAVIMENTO

Figura 7.19 - Perfil de PMV do Laboratório localizado 1º Pavimento do Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 1447 horas de desconforto térmico por calor;
- 2946 horas de desconforto térmico por frio;
- 4367 horas de conforto térmico;

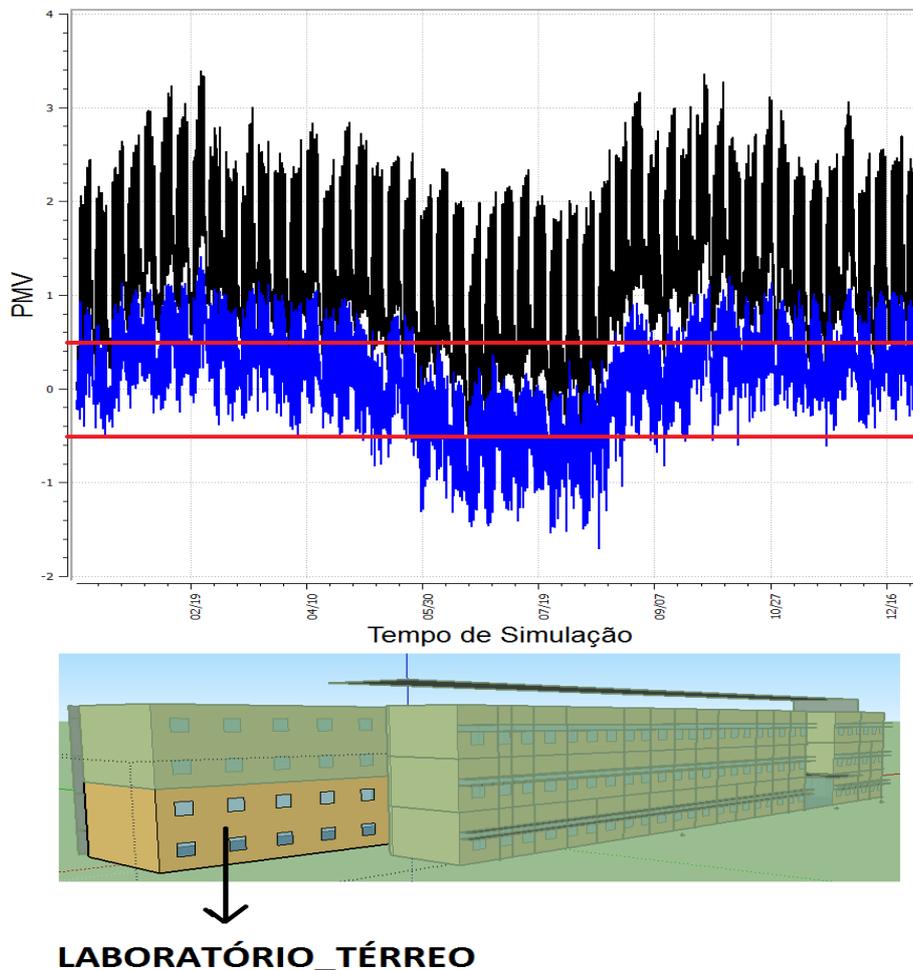


Figura 7.20 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 2648 horas de desconforto térmico por calor;
- 1732 horas de desconforto térmico por frio;
- 4380 horas de conforto térmico;

Os resultados de uma maneira geral mostram que para o caso de estudo o sistema de resfriamento evaporativo é muito mais efetivo em garantir o conforto térmico se comparado ao sistema de ventilação forçada apresentado na seção anterior.

Note ainda, que nos ambientes localizados no bloco de Laboratórios, o sistema proposto nesta seção se apresenta bastante eficiente no que diz respeito à obtenção do conforto térmico nos ambientes. Como apresentado acima, nesses ambientes o sistema de sombreamentos possuem um influencia muito grande, atenuando de forma expressiva a carga térmica dos mesmos.

Além disso, como verificado na introdução desta seção, o sistema de resfriamento evaporativo atua promovendo a saturação adiabática do ar. Dessa forma, quanto mais seco estiver o ar, maior será

a capacidade do ar em absorver vapor d'água, e conseqüentemente maior será o efeito de redução da temperatura do ar, visto que para se evaporar mais água, mais calor deverá ser retirado do ar a ser insuflado nos ambientes climatizados.

7.4 Sistema de climatização por expansão indireta

7.4.1 Chiller com condensação a ar

7.4.1.1 O sistema

Para configurar o sistema de água gelada com o *chiller* de condensação a ar e climatizar as zonas térmicas, adotou-se um sistema com circuito primário e secundário como representado abaixo na Figura 7.21.

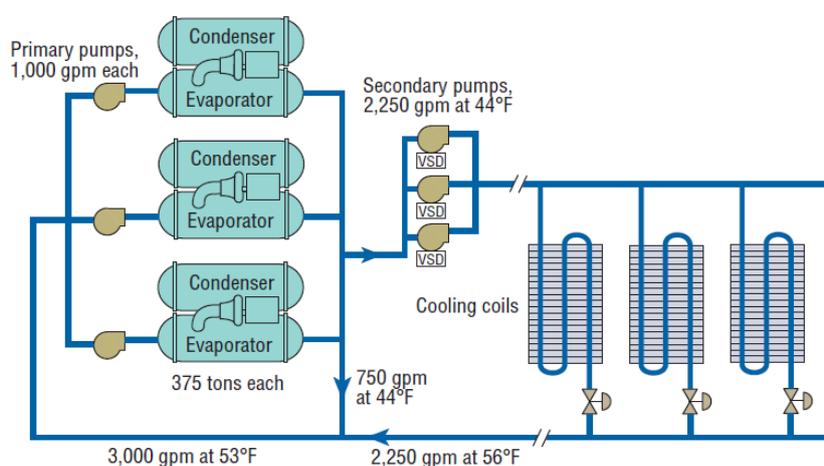


Figura 7.21 - Planta de água gelada do sistema de climatização por expansão indireta.

O circuito representado acima funciona da seguinte maneira: a bomba primária (*Primary pump*), bombas de vazão constante, succiona água quente para que o *chiller* possa resfriá-la. Após a água ser resfriada, a bomba do circuito secundário (*Secondary pump*), bomba de vazão variável, succiona a água gelada e a leva até as unidades *fan coils*. Essas unidades são em suma trocadores de calor. Elas possuem serpentinas por onde a água gelada circula e sobre as quais o ar a ser tratado é forçado a passar, para que troque calor com a água gelada e possa ser em seguida, insuflado no ambiente a ser climatizado.

Ao trocar calor com o ar, a água então retorna para ser novamente resfriada. O calor agora contido nessa água quente de retorno será rejeitado na unidade condensadora do *chiller* (*Condenser*), a qual será resfriada via indução de ar por ventiladores.

O *chiller* selecionado para atender a demanda da planta primária (ou circuito primário) foi o *chiller Trane CGAM52*. Este *chiller* possui uma capacidade nominal de 52 TR. Como a carga térmica total do edifício é de 80 TR, foram necessários dois *chillers* deste modelo. Poderia ter sido escolhido apenas um *chiller* com capacidade igual ou superior a 80 TR. A decisão por se escolher dois com

menor capacidade se deu basicamente por dois motivos: no caso de um *chiller* apresentar problemas técnicos, o outro poderá atender, ainda que de forma parcial, a demanda de carga do edifício. O segundo motivo, e principal, é a possibilidade do uso de uma estratégia de sequenciamento destes equipamentos. Esta estratégia foi adotada visando-se obter eficiência energética no uso desses equipamentos. Para a simulação foram adotados alguns parâmetros de projeto apresentado na Tabela 7.4abaixo.

Tabela 7.4 - Configurações de referência do Chiller com condensação a ar.

Chiller - Trane CGAM52	
Capacidade Térmica[TR]	52
COP	2,93
Regime mínimo de operação	25%
Regime de operação de eficiência ótima	50%
Temperatura de saída da água gelada	7,0°C
Temperatura de entrada do ar para condensação	32,1°C

O equipamento acima selecionado é composto por 4 compressores do tipo *scroll*. Cada compressor tem a capacidade de atender uma carga de 13 TR. Isso significa que os compressores ligam em etapas; à medida que a demanda por carga na planta primária aumenta. Assim, os primeiros 25% de carga demandada são atendidos por um compressor, os primeiros 50%; por dois, e assim sucessivamente até que a demanda exceda os 75%, sendo neste caso todos os compressores ativados. O melhor COP deste equipamento é obtido quando ele atua em carga parcial de 50%, um valor em torno de 5. Seu pior COP se encontra quando o mesmo atua com 100%, algo em torno de 3. Para um uso em carga parcial e 25 e 75% este equipamento trabalha com COPs entre 3 e 5. Dessa forma, a estratégia de sequenciamento deve sempre fazer com esses equipamentos trabalhem com 50% de sua capacidade instalada, e na pior das hipóteses em 25% ou 75%, mais nunca em plena carga.

Para explicar a estratégia utilizada considere dois *chillers* “A” e “B”, do mesmo modelo apresentado acima na Tabela 7.4. Considere ainda que cada *chiller* possua 4 compressores. AC1 indica o compressor 1 do *chiller* “A”, BC1 indica o compressor 1 do *chiller* “B”, e assim sucessivamente.

O funcionamento dessas unidades funcionara segundo as sucessivas etapas abaixo apresentadas:

1. Demanda de carga da planta primária menor que 25% (valor absoluto menor que 20 TR): o compressor AC1 e AC2 serão ativados (capacidade do equipamento 26TR, dois compressores do *chiller* “A” estarão ligados, fazendo o equipamento atuar em carga parcial próxima a 50%);
2. Demanda de carga da planta primária maior que 25% e menor que 50% (valor de demanda entre 20 e 40 TR): o compressor BC1 e BC2 serão ativados (capacidade do equipamento é de 52TR, dois compressores de cada *chiller* estarão ligados, fazendo com que cada *chiller* atue em carga parcial próxima a 50%);
3. Demanda de carga da planta primária maior que 50% e menor que 75% (valor de demanda entre 40 e 60 TR): o compressor AC3 será ativado (capacidade do equipamento é de 65TR,

três compressores do *chiller* “A” e dois compressores do *chiller* “B” estarão ligados, fazendo com que o *chiller* “A” atue em carga parcial próxima a 75% e o *chiller* “B” trabalhe em carga parcial próxima a 50%);

4. Demanda de carga da planta primária maior que 75% e menor que 50% (valor de demanda entre 60 e 80TR): o compressor AC4 e BC4 serão ligados (capacidade do equipamento é de 91 TR, quatro compressores do *chiller* “A” e três compressores do *chiller* “B” estarão ligados, fazendo com que o *chiller* “A” atue em carga plena e o *chiller* “B” trabalhe em carga parcial próxima a 75%);

Resumo das etapas: note que apenas em uma das etapas (etapa 4) o *chiller* “A” ou o *chiller* “B” trabalha na pior das condições de eficiência energética, ou seja, em carga plena. Note ainda em três das 4 etapas (etapas 1, 2 e 3) os equipamentos trabalham em carga parcial de 50%, e ainda na 4 etapa o um dos equipamentos opera a 50%.

Partindo agora para a solução de atender a carga utilizando apenas um *chillers* ao invés de dois, o mesmo raciocínio será apresentado, o modelo de o modelo *chiller* CGAM90, com capacidade de 90 TR.

O modelo CGAM90 possui quatro compressores sendo dois deles com capacidade de 20 TR e os outros dois com capacidade de 25 TR. Ele possui um funcionamento muito parecido como o modelo apresentado anteriormente. Para este equipamento, ativa-se o primeiro o compressor de 20 TR de capacidade. Em seguida, o compressor de 25 TR de capacidade, depois o terceiro a ser ativado será o outro compressor de 20 TR e por último, quando estiver trabalhando em carga plena, o segundo compressor de 25 TR será ativado. Em termos de COP, a mesma característica apresentada para o CGAM52 se aplica a este equipamento, ou seja, seu melhor COP é obtido quando o mesmo trabalha em carga parcial de 50%. Seu pior desempenho se encontra quando o mesmo trabalha em carga plena, 100%, e para cargas parciais de 25% e 75% o equipamento possui uma eficiência intermediária entre os valores de COP obtidos para 50 e 100% de carga.

A mesma sequência de etapas apresentadas acima será desenvolvida abaixo para este equipamento. Considere para isso, o *chiller* CGAM90 como sendo o *chiller* “C” e CC1, CC2, CC3 e CC4 os respectivos compressores deste equipamento com capacidades de 20, 25, 20 e 25 TR, respectivamente.

1. Demanda de carga da planta primária menor ou igual 25% (valor absoluto menor que 20 TR): o compressor CC1 será ativado (capacidade do equipamento 20TR, um compressor do *chiller* “C” será ligado, fazendo o equipamento atuar em carga parcial próxima a 25%);
2. Demanda de carga da planta primária maior que 25% e menor que 50% (valor de demanda entre 20 e 40 TR): o compressor CC1 e CC2 serão ativados (capacidade do

equipamento 45TR, dois compressores do *chiller* “C” estarão ligados, fazendo com que o equipamento atue em carga parcial de próxima a 50%);

3. Demanda de carga da planta primária maior que 50% e menor que 75% (valor de demanda entre 40 e 60 TR): o compressor CC3 será ativado (capacidade do equipamento é 65TR, três compressores do *chiller* “C” estarão ligados, fazendo com que a unidade resfriadora de líquido atue em carga parcial próxima a 75%.
4. Demanda de carga da planta primária maior que 75% e menor que 50% (valor de demanda entre 60 e 80TR): o compressor CC4 será ativado (capacidade do equipamento 90TR, quatro compressores do *chiller* “C” estarão ligados, fazendo com que o *chiller* “C” atue em carga plena.

Resumo das etapas: note que apenas em uma das etapas (etapa 2) o *chiller* “C” opera na melhor condição, em 50% de carga. Note ainda que na etapa quatro, o mesmo opera em plena carga, o que não ocorreu em nenhum momento na situação acima.

Vale notar que no funcionamento real desses dois sistemas, as etapas 1 e 3 serão as mais recorrentes ao longo do ano. A etapa 1 representa um comportamento típico de manhas e fins de tarde. Já a etapa 3 representa um comportamento típico de período vespertino, podendo este período em algumas épocas do ano ser representado pela etapa 4. Note que é exatamente nestas etapas onde a opção por dois *chillers* se apresenta mais vantajosa do ponto de vista de eficiência energética.

Continuando a descrição do sistema de água gelada, considerou-se para as bombas do circuito primário e secundário uma capacidade de levantamento de pressão de 18,3 metros de coluna d’água e uma eficiência do motor de 90%.

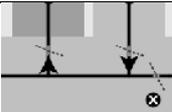
Optou-se por utilizar uma unidade *fancoil* por pavimento do prédio. Como parâmetros de projeto adotou-se uma temperatura de 14°C para o ar a ser insuflado e uma pressões estática disponíveis para nos duto de 500 Pa. Após ser tratado em cada unidade, o ar será então distribuído e insuflado em cada ambiente por meio de dutos. Cada ambiente contará também, com um sistema de dutos responsável por promover a renovação de ar exigida por norma, além se uma rede de dutos responsável por promover o retorno do ar para a unidade de tratamento.

7.4.1.2 Simulação

Para modelar o sistema acima descrito, foram utilizados os seguinte componentes apresentados na tabela a seguir Tabela 7.5.

O componente Trocador de calor com módulo para aquecimento é colocado apenas por questões de exigência da norma *ASHRAE 90.1*, a qual traz em seu apêndice G a obrigatoriedade do uso em simulação desse componente, mesmo que o projeto não contemple um sistema de aquecimento.

Tabela 7.5 - Componentes utilizados na modelagem do sistema de água gelada.

	Chiller elétrico com condensação a ar
	Bomba com vazão constante
	Termostato para água
	Trocador de calor
	Bomba com vazão variável
	Trocador de calor (<i>Fancoil</i>) – Apenas módulo resfriador
	Trocador de calor – Apenas módulo de aquecimento
	Ventilador com vazão constante
	Termostato para o ar
	Terminal de ar sem reaquecimento
	Zona térmica climatizada
	Tomada de ar externo (saída e entrada de ar)

O componente Trocador de calor com módulo para aquecimento é colocado apenas por questões de exigência da norma *ASHRAE 90.1*, a qual traz em seu apêndice G a obrigatoriedade do uso em simulação desse componente, mesmo que o projeto não contemple um sistema de aquecimento.

A modelagem do sistema acima proposto e a devida conexão feita entre os componentes acima descritos pode ser vista nas três figuras seguintes.

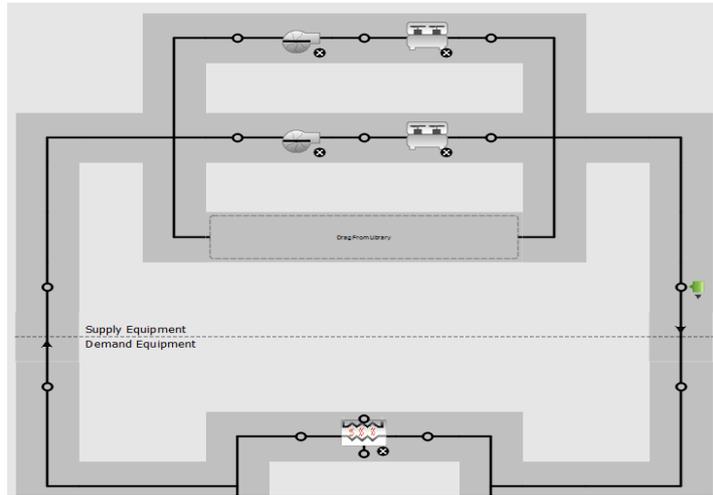


Figura 7.22 - Modelagem do circuito primário de água.

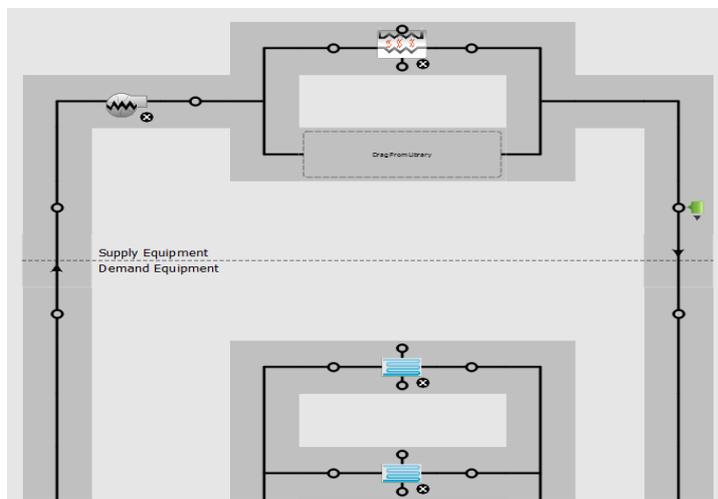


Figura 7.23 - Modelagem do circuito secundário água .

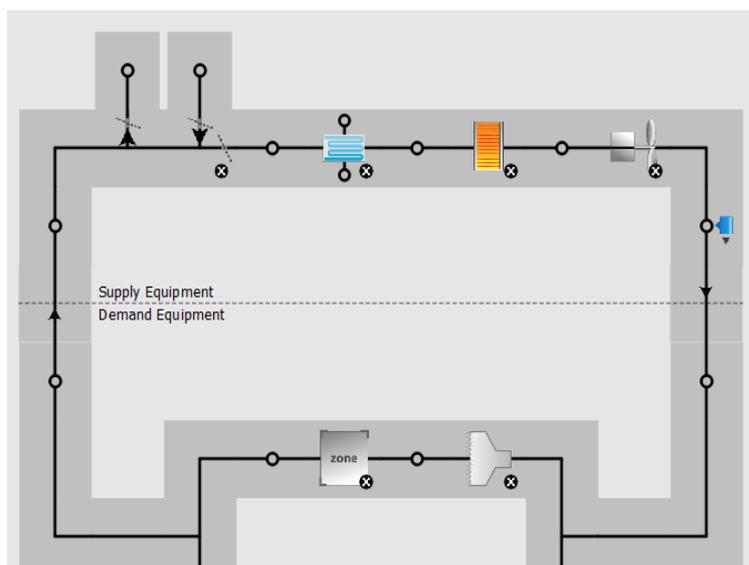


Figura 7.24 - Modelagem da planta de ar.

7.4.1.3 Otimização

O sistema acima passou por um processo de otimização visando um aumento da eficiência energética da solução de climatização adotada. Neste processo duas estratégias foram analisadas:

- Utilização de *free cooling* na renovação de ar;
- Utilização de vazão de ar variável no sistema de insuflamento do ar;

Ambas as estratégias e seus resultados serão apresentados na sequência.

7.4.1.3.1 Otimização–Free Cooling

Visando uma redução no consumo de energia elétrica do sistema de resfriamento foi proposto e modelado um sistema inteligente para a promoção da renovação do ar. Por norma, cada ambiente da edificação deve contemplar um valor mínimo de ar de renovação que se relaciona diretamente com o número de pessoas que ocupam um determinado ambiente. A vazão de ar de renovação somada à vazão de ar de retorno totaliza o total de ar a ser insuflado no ambiente conforme mostra o esquema abaixo na Figura 7.25.

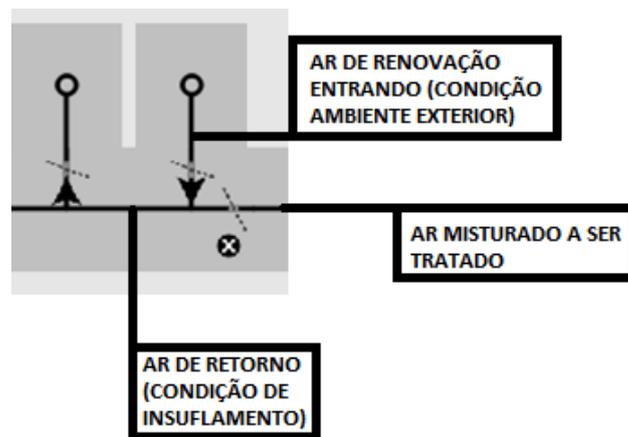


Figura 7.25 - Esquema apresentando o sistema de renovação de ar.

Dessa forma, como mostra a figura acima, tem-se o ar em três estados distintos:

- Ar de retorno – ar a temperatura da zona climatizada (temperatura de bulbo seco em torno de 23°C e aproximadamente 60% de umidade relativa);
- Ar de renovação – ar com as mesmas condições do ar exterior (mesma temperatura de bulbo seco e mesma umidade do ar externo);
- Ar misturado – mistura resultante da junção entre o ar de retorno e o ar de renovação (ar a ser tratado e em seguida insuflado);

O sistema é projetado para sempre trazer o mínimo de ar de renovação para atender a norma. Ao se misturar esse ar com o ar de retorno, se consumira energia para retratar essa mistura. Isso irá ocorrer sempre que a entalpia do ar de renovação (ar externo) for maior que a entalpia do ar interno de retorno.

De maneira geral, pode-se dizer que isso ocorrerá durante os períodos vespertinos. Entretanto, logo no início da manhã e no fim das tardes, principalmente nos períodos de inverno, a situação é oposta: a entalpia do ar de retorno é maior que a entalpia do ar externo. Nessas condições, é mais conveniente que o sistema faça uma renovação de ar completa, visto que neste caso o sistema estará gastando menos energia para condicionar o ar. Esse conceito é conhecido como *free cooling*. Ao pé da letra, essa expressão quer dizer arrefecimento grátis. Na prática é exatamente isso que ocorre: esta estratégia permite que o sistema trate um ar que se encontra em um estado muito mais próximo ao estado final que se deseja condicionar o mesmo para antes de insuflá-lo no ambiente desejado. A Figura 7.26 abaixo representa dois processos: $1 \rightarrow 2$ e $1' \rightarrow 2$. O ponto 2 representa a condição de insuflamento do ar, ou seja, a condição em que o sistema de climatizada deve fornecer o ar a zona térmica climatizada.

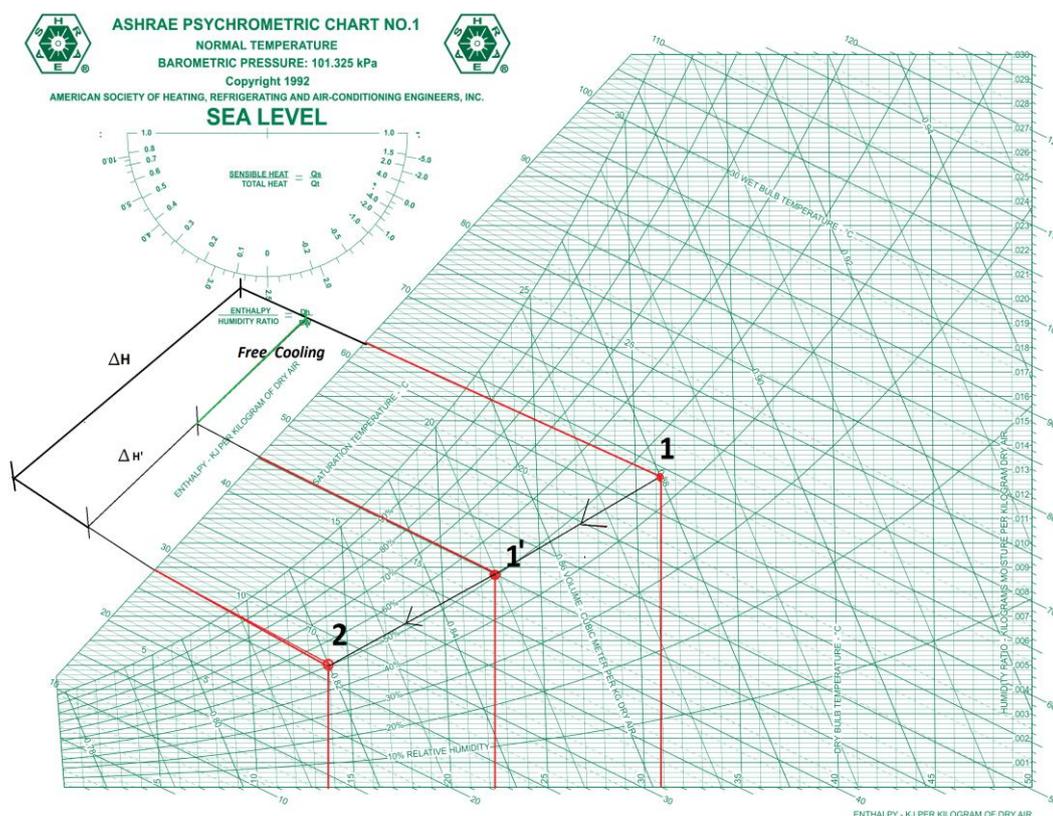


Figura 7.26 - Processo de tratamento do ar representado na carta psicométrica.

Os pontos 1 e 1' representam o estado termodinâmico do ar exterior em dois momentos distintos do dia. Note que o segundo processo apresenta uma menor diferença de entalpia. O processo, $1' \rightarrow 2$, poderia ser uma representação do que ocorre no início dos períodos matutinos e final dos períodos vespertinos, ou seja, o ar externo apresenta um condição mais favorável para ser tratado do que o ar de retorno. Nessa situação seria feito, como dito acima, uma renovação completa do volume de ar. Já no caso do processo $1 \rightarrow 2$, a condição inicial do ar a ser tratada (1) é mais austera e, portanto, demandará

um maior consumo energético por parte do sistema de climatização. Sendo assim, quanto maior for à tomada de ar externo maior será o consumo energético, e por isso, quando o sistema identifica essa situação à renovação de ar não deve ser completa. Neste caso a tomada de ar externo é a mínima suficiente para se atender as exigências da norma. A diferença marcada em verde na figura corresponde ao *free cooling*, ou seja, corresponde a taxa de energia específica que o sistema deixou de gastar por se aproveitar de um condição de ar externo mais favorável.

Em termos de simulação, o seguinte procedimento foi realizado: o sistema foi programado para fazer uma medida psicrométrica do ar externo e outra do ar interno. Sempre que a entalpia do ar externo for maior que a entalpia do ar interno de retorno à renovação será feita a um volume mínimo, que vise atender a norma *ASHRAE 62.1*. Por outro lado, nos casos em que a entalpia do ar externo for menor que a entalpia do ar interno, a tomada de ar externo será máxima.

7.4.1.3.2 Otimização – VAV

O sistema de vazão de ar variável (VAV) tem sido cada vez mais utilizado nos sistemas HVAC. Esta estratégia tem como objetivo principal a redução no consumo por parte dos ventiladores e consequentemente a busca por uma maior eficiência do sistema. Estratégias deste tipo exigem certo nível de controle e automação para que os processos e tomadas de decisão do sistema não afetem negativamente o funcionamento do mesmo.

O funcionamento do sistema VAV pode ser descrito da seguinte forma: um termostato é colocado de forma adequada no interior do ambiente que se deseja climatizar. Esse termostato será responsável por fazer uma leitura na temperatura de bulbo seco do ar interior. Feita essa leitura, o sistema compara o resultado com a temperatura de conforto selecionada para o dado ambiente. No caso dessa temperatura ser maior que o valor de configurado para conforto a caixa VAV devidamente alocada na entrada do duto de insuflamento de ar permitirá uma maior vazão de ar. Caso seja detectada uma temperatura inferior à temperatura de conforto o sistema irá reduzir a vazão de ar nesse ambiente. Nesta situação, a pressão ao longo do duto irá aumentar. Um equipamento medidor de pressão posicionado no interior do duto irá identificar o aumento de pressão na rede. Nesta situação, o ventilador, dotado de um variador de frequência irá reduzir sua rotação, consequentemente reduzindo o consumo energético do sistema. A Tabela 7.6 apresenta novos componentes da planta de ar.

Tabela 7.6 - Componentes adicionados a planta de ar com sistema VAV.

	Terminal de ar com volume de ar variável sem reaquecimento
	Módulo ventilador com velocidade variável do <i>Fancoil</i>

Em termos de simulação energética, o dois componentes do sistema “sem otimizações” foram alterados: o ventilador, que antes era de vazão constante foi substituído por um ventilador de vazão variável e o terminal de ar foi substituído por um termina com volume de ar variável.

7.4.1.4 Resultados

A Figura 7.27 apresenta o consumo energético anual total do edifício *nZEB* quando o sistema de espação indireta (*chiller* com condensação ar) e adotado como solução de climatização. Além disso, o gráfico traz informações a respeito do consumo energético referente à climatização ativa implementado no edifício.

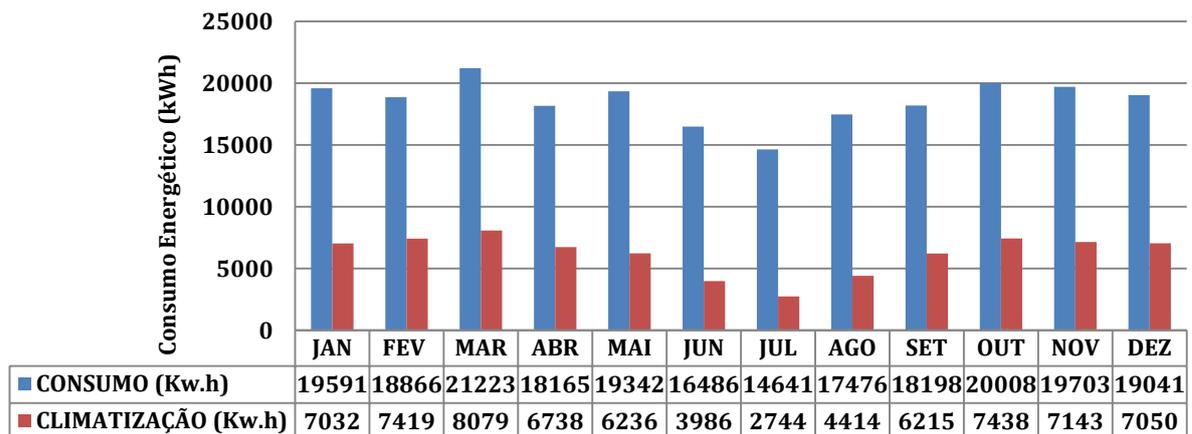


Figura 7.27 - Consumo energético anual do edifício *nZEB*.

O consumo total do edifício *nZEB* climatizado apenas com um sistema de expansão indireta utilizado dois *chillers* com condensação ar foi de 223.741 kWh ao ano. O consumo do sistema de climatização representa 54% do consumo total (considerando bombas, ventiladores e o *chiller*), um valor absoluto de 74.493 kWh. A Figura 7.28 abaixo exhibe o consumo energético do edifício discriminado por componentes.

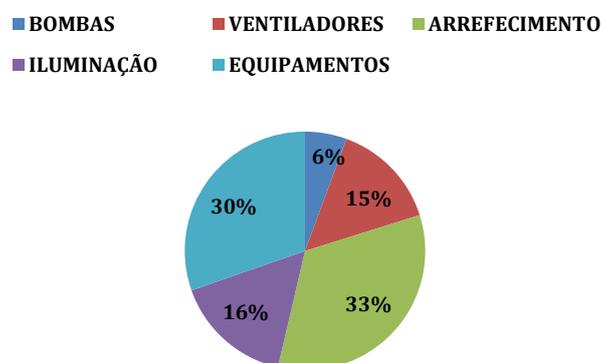


Figura 7.28 - Consumo energético por componente.

Comparado ao consumo do energético do edifício quando se considerou o sistema de ventilação forçada, este sistema apresentou um consumo 27% maior. Com relação à razão consumo energético anual por metro quadrado, o resultado obtido com o uso do sistema de espaço indireta foi de 91 kWh/m².ano. Note que se comparado à razão obtida para o sistema climatizado com resfriamento evaporativo do ar, este valor é maior. No entanto, essa solução garante conforto térmico em todos os horários de ocupação do edifício.

Considerando a proposta de utilização de apenas um *chiller* de condensação ar, o consumo total da edificação foi calculado em 235.138 kWh por ano. Este valor é 5% superior à solução utilizando dois *chillers*. Isto comprava as afirmativas feitas acima com respeito à vantagem pelo da estratégia de sequenciamento desses componentes. A figura 7.30 apresenta um gráfico apresentado graficamente as 4 etapas de funcionamento apresentadas na seção 7.4.1.1.

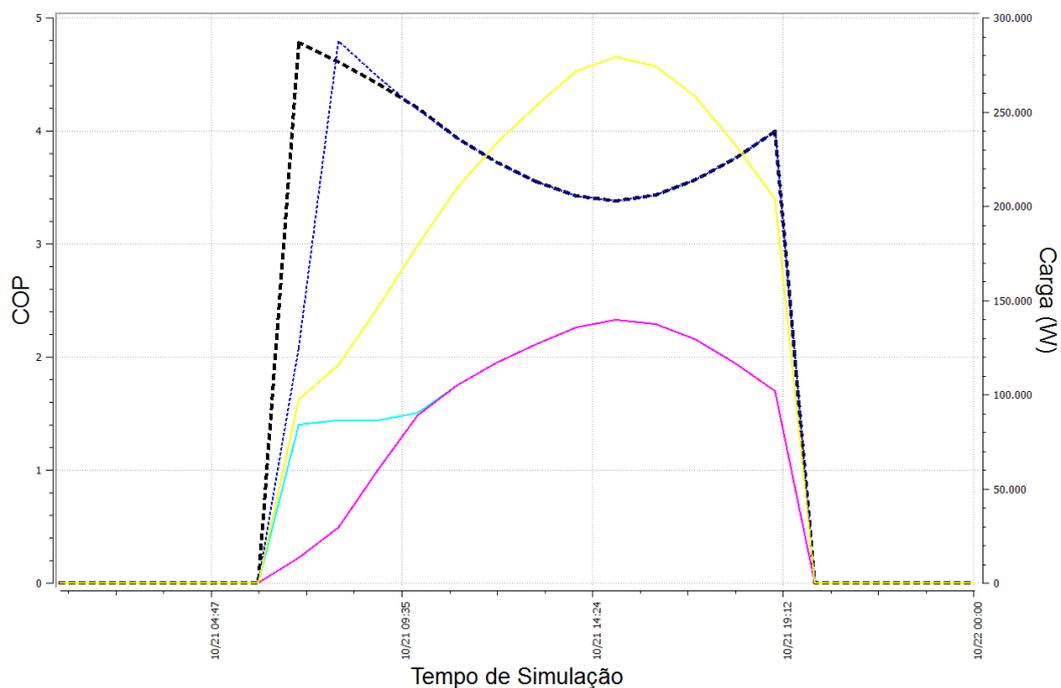


Figura 7.29- Evolução de demanda de carga e COP dos *chillers* para um dia típico de projeto.

As curvas pontilhadas preta e azul representam o COP dos *chillers* “A” e “B” respectivamente. A curva em azul e a curva em rosa representam a demanda de carga para os *chillers* “A” e “B” respectivamente. Em amarelo, está representada a curva de demanda de carga da planta primária do sistema. No período da manhã, basicamente se tem as etapas 1 e 2 descritas na seção 7.4.1.1, onde no início apenas um equipamento opera com 50% de carga e em seguida ambos operam em cargas parciais próximas a 50%, chegando a atingir valores de COP próximos a 5. A etapa 4 descreve o período vespertino, onde a curva em amarelo atinge seu pico. Nesta situação, os equipamentos trabalham em cargas parciais, com COP variando entre 3 e 4.

A sequência de figuras que serão apresentados mostrarão os resultados do perfil de PMV para um ano típico de projeto para os mesmos seis ambientes apresentados na seção de resultados do capítulo referentes às soluções estudadas. Nos gráficos as curvas em azul representam o perfil de PMV utilizando como solução de climatização o sistema de expansão indireta, enquanto que a curva em preto apresenta resultados referentes ao sistema em evolução livre.

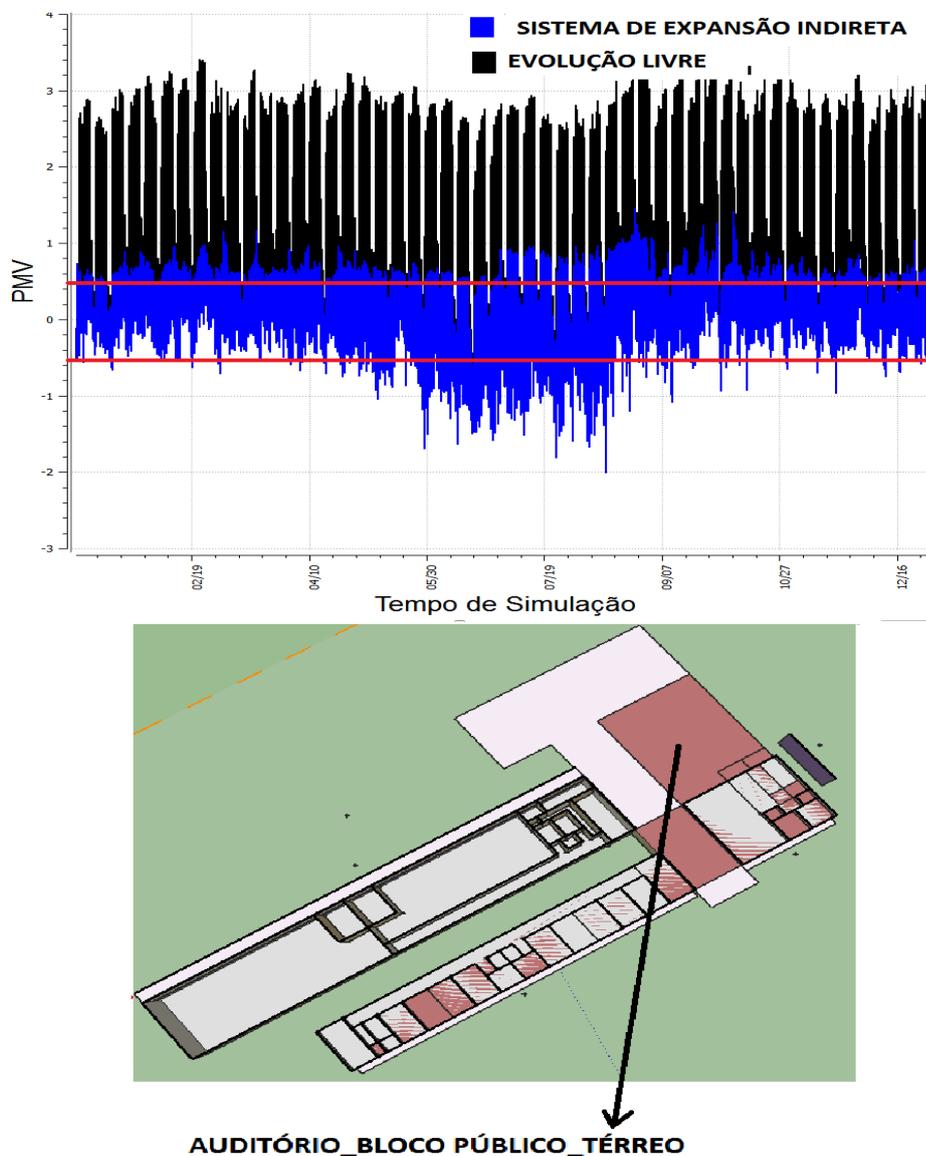


Figura 7.30 - Perfil de PMV para um dia típico de projeto para o Auditório localizado no Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Auditório localizado no Bloco Público:

- 2030 horas de desconforto térmico por calor;
- 1732 horas de desconforto térmico por frio;
- 4998 horas de conforto térmico;

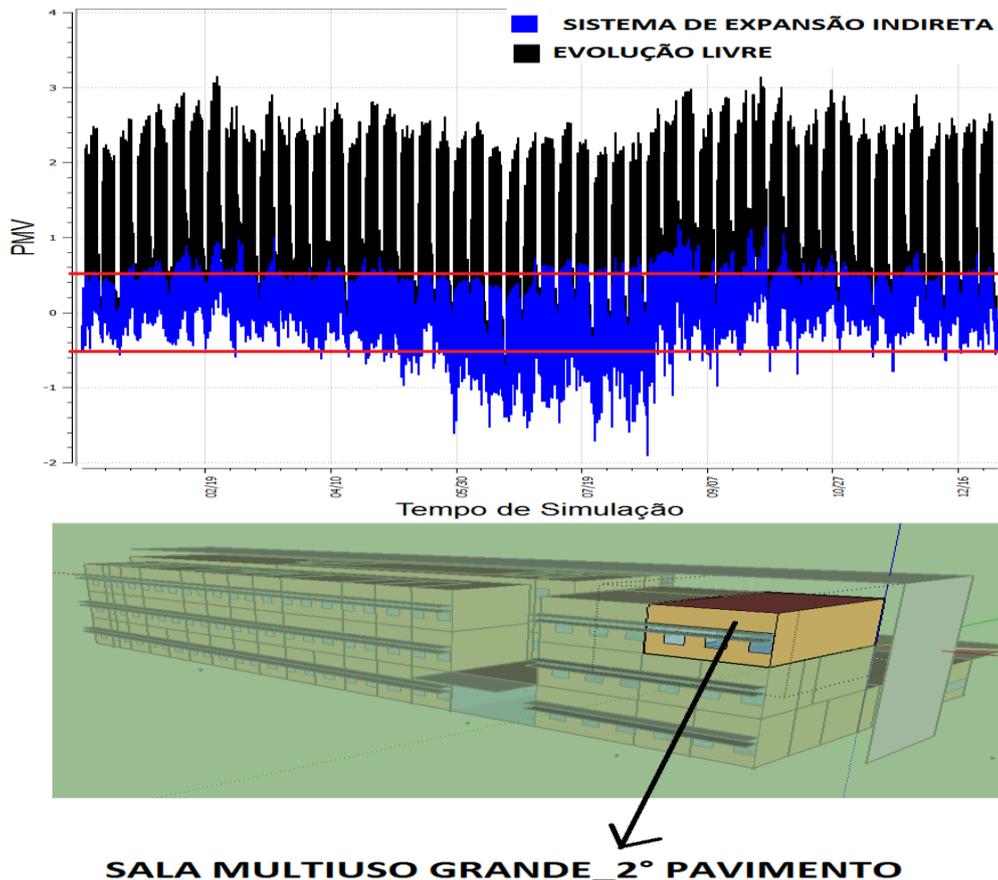
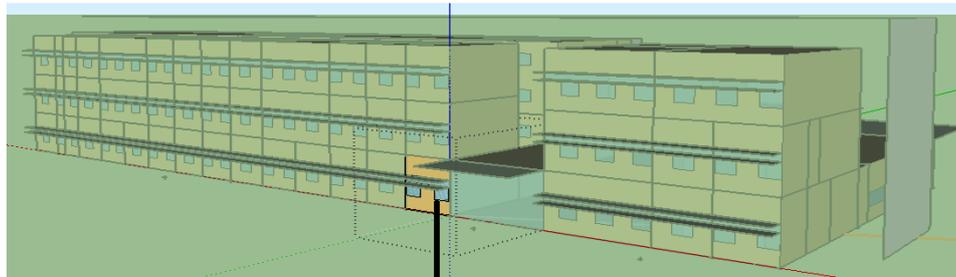
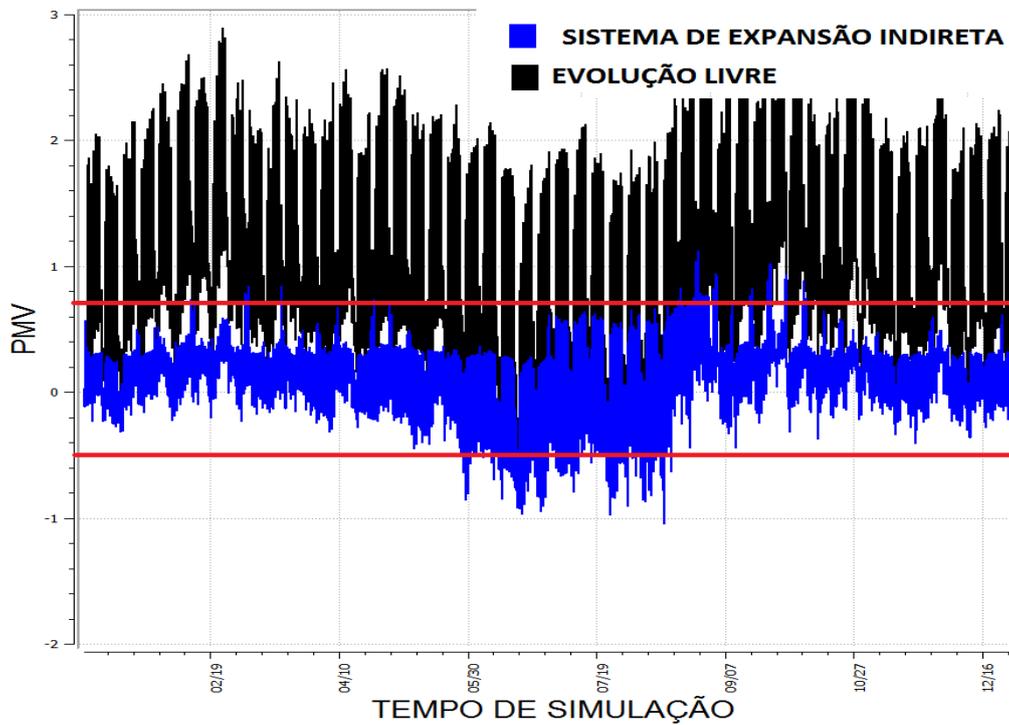


Figura 7.31 - Perfil de PMV para a Sala de multiuso do Bloco Público.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala Multiuso localizado no Bloco Público:

- 2007 horas de desconforto térmico por calor;
- 1407 horas de desconforto térmico por frio;
- 5346 horas de conforto térmico;

A Figura 7.32 e Figura 7.33 apresentam os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Escritórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

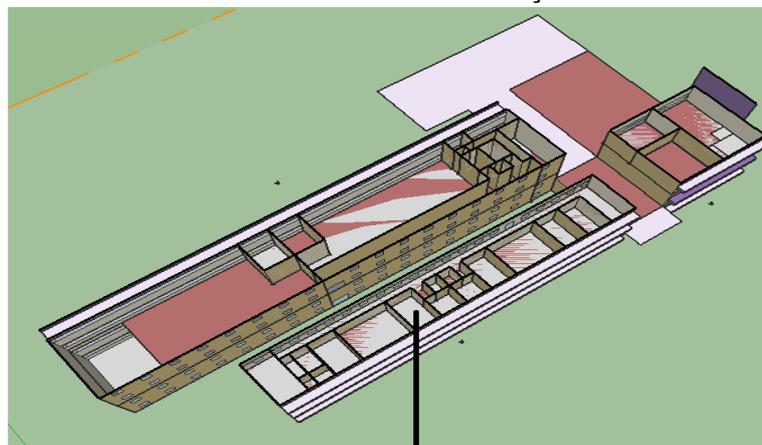
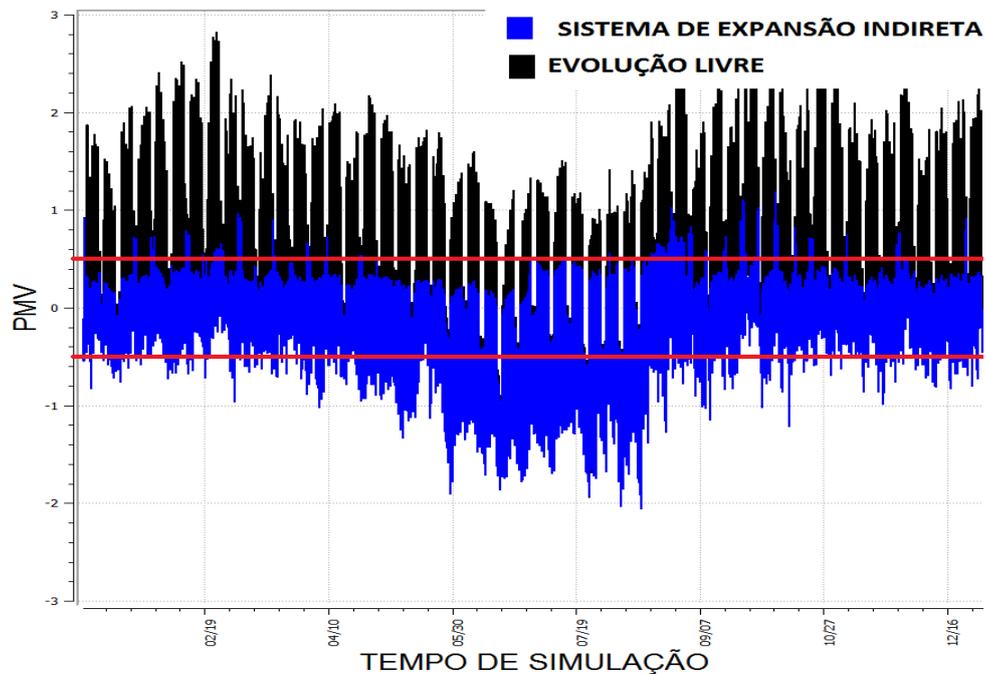


SALA DE ADMINISTRAÇÃO_TÉRREO

Figura 7.32 - Perfil de PMV da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios:

- 1509 horas de desconforto térmico por calor;
- 661 horas de desconforto térmico por frio;
- 6414 horas de conforto térmico;



**SALA PROFESSOR/COORDENADOR_BLOCO DE
ESCRITÓRIOS_2ºPAVIMENTO**

Figura 7.33 - Perfil de PMV da Sala de Professor/Coordenador localizado no Bloco de Escritórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico da Sala de Administração localizado no Bloco de Escritórios:

- 1509 horas de desconforto térmico por calor;
- 740 horas de desconforto térmico por frio;
- 6511 horas de conforto térmico;

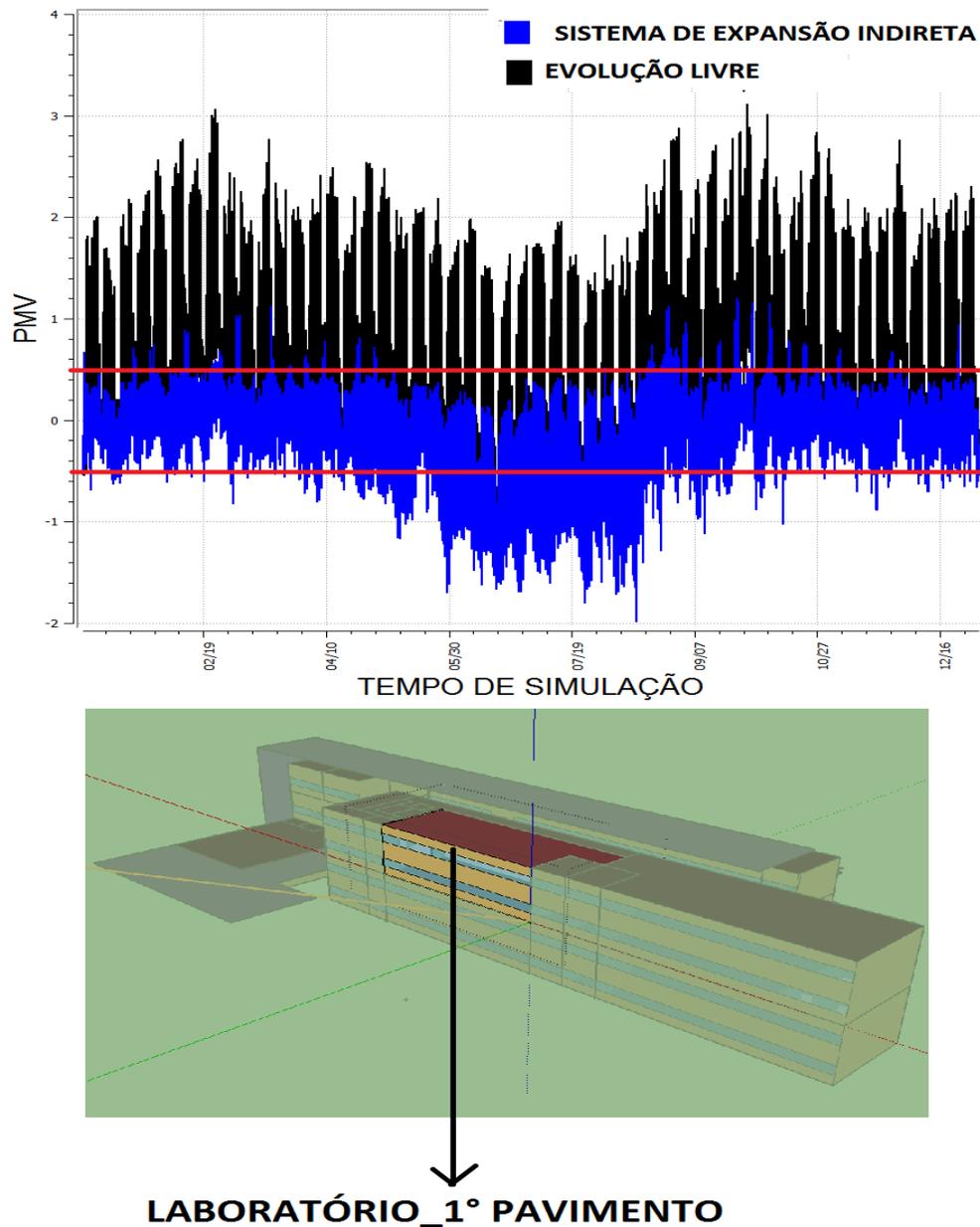


Figura 7.34 - Perfil de PMV do Laboratório localizado 1º Pavimento do Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas paras as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 1371 horas de desconforto térmico por calor;
- 1157 horas de desconforto térmico por frio;
- 6232 horas de conforto térmico;

A Figura 7.35 e a Figura 7.36 apresenta os perfis de PMV para dois ambientes do Bloco de Laboratórios considerando os ambientes em evolução livre e considerando os ambientes climatizados com ventilação forçada.

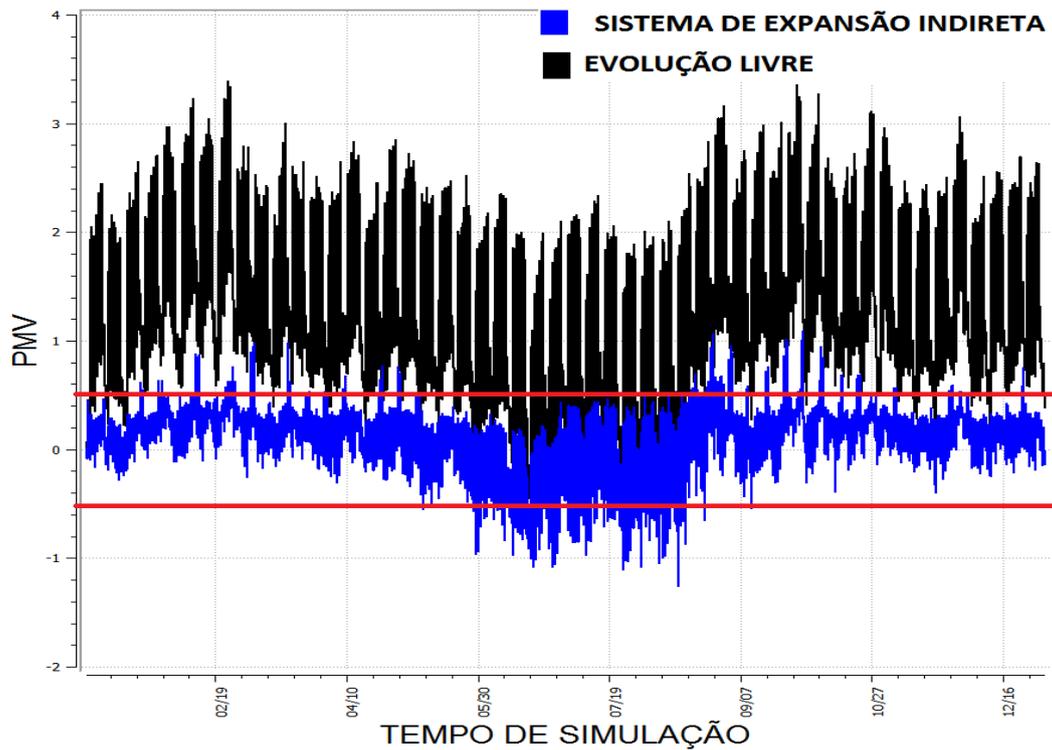


Figura 7.35 - Perfil de PMV do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios.

Considerando as 8760 de horas para as quais o modelo foi simulado, foram obtidos os seguintes resultados quanto ao conforto térmico do Laboratório localizado no Bloco de Laboratórios:

- 1413 horas de desconforto térmico por calor;
- 1132 horas de desconforto térmico por frio;
- 6215 horas de conforto térmico;

Os resultados de uma maneira geral mostram para o caso de estudo que o sistema de expansão indireta é bem mais efetivo em garantir o conforto térmico dos ambientes, garantindo um número de horas de conforto superior às propostas anteriores.

A tendência dos ambientes localizados no Bloco de Laboratórios de apresentarem maior número de horas de conforto se se repetiu na análise dessa solução. Além disso, note que os perfis de PMV dos ambientes localizados no bloco Administrativo apresentam um perfil de PMV mais estável, se comparado aos ambientes dos demais blocos.

7.4.1.5 Resultados da Otimização do Sistema–Free Cooling

Como relatado acima, o sistema de climatização por expansão indireta foi otimizado e seus resultados são apresentados abaixo. Em termos de consumo energético total do edifício, a redução em relação ao sistema não otimizado foi de 20%, baixando o consumo de 223.741 kWh por ano para 178.249 kWh. Com esse novo consumo a razão consumo anual por área reduziu em 16% (78 kWh/m².ano).

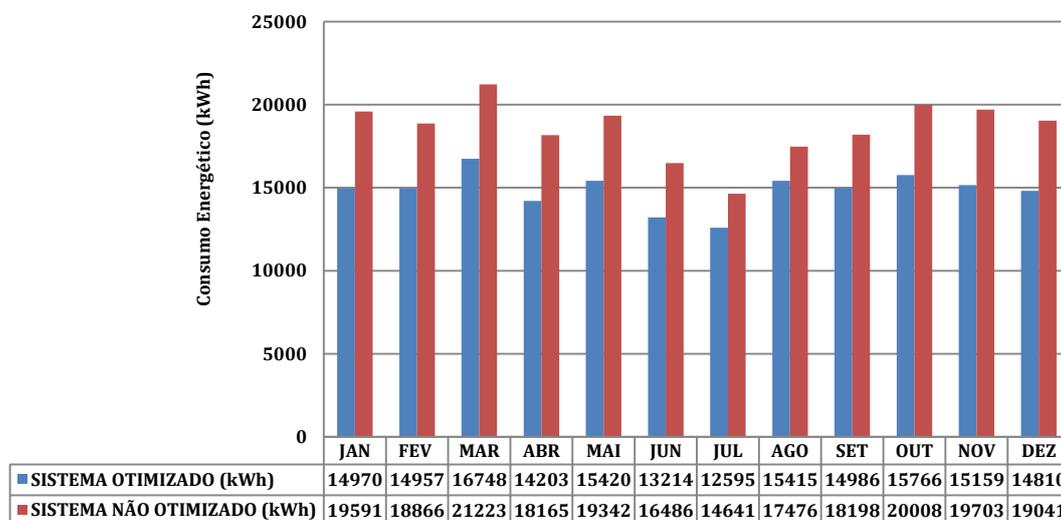


Figura 7.36 - Consumo energético considerando o sistema HVAC com e sem *free cooling*.

Em termos de equipamentos, a redução no consumo foi de 8% para as bombas, 8% para o chiller de condensação a ar e 2% para os ventiladores.

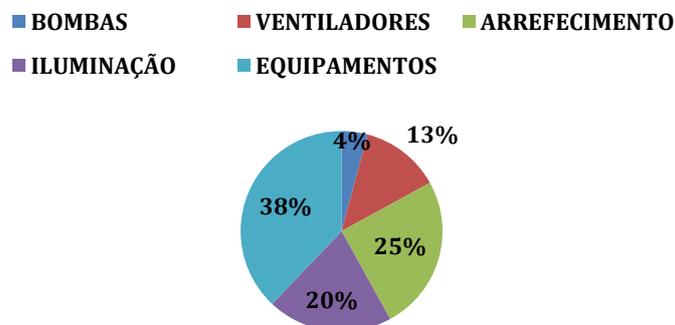


Figura 7.37 - Consumo por componente considerando o sistema otimizado.

Note que a redução de consumo em termos de componentes e menos expressiva para os ventiladores. Isso ocorre, porque independentemente da utilização do *free cooling* o insuflamento de ar nos ambientes continua sendo necessário. Por outro lado, o fato de aproveitar o ar externo para reduzir o consumo, diminui a demanda de carga na planta primária e secundária. Em outras palavras menos água precisa ser resfriada e menos água precisa ser bombeada, demonstrando porque o *chiller* e as bombas (primárias e secundárias) são os componentes que apresentam maior redução de consumo energético. A Figura 7.38e Figura 7.39apresentam, respectivamente, a carga demanda na planta primária e a potência consumida por uma das bombas do circuito primário para um dia típico de projeto para ambas situações: a situação com o *free cooling* (curva em azul) e a situação sem a estratégia de otimização (curva em preto).

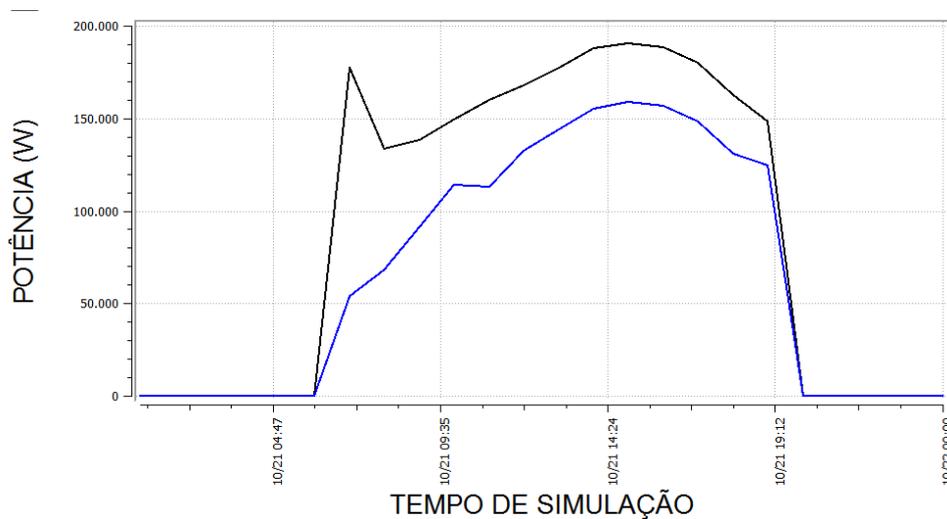


Figura 7.38 - Perfil de demanda de carga na planta primária com e sem otimização

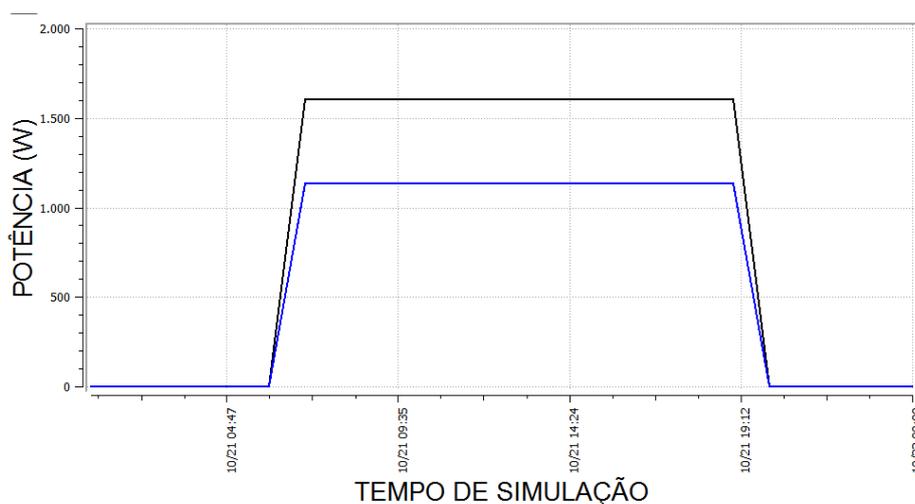


Figura 7.39 - Potência consumida pela bomba do circuito primário com e sem otimização.

Nos dois casos acima representados as curvas se localizam sobre o zero no início e no fim da simulação. Isso indica que para esses períodos o sistema HVAC encontra-se desligado. Em ambos os gráficos há uma redução de potência consumida. Essa redução impacta de forma direta no consumo energético do sistema como um todo. Note ainda na Figura 7.38 que considerando o período de simulação, um dia típico de projeto, a redução na demanda da planta primária é mais expressiva no início da simulação, período este correspondente ao período matutino. Este comportamento era esperado, uma vez que este é o período onde as condições externas são mais favoráveis para realização do *free cooling*.

7.4.2 Resultados de otimização do sistema - VAV

Após passar por uma segunda otimização, considerando como base de comparação o consumo energético do modelo utilizando a estratégia de *free cooling*, os resultados apontaram para uma redução percentual de 6%. Em valores absolutos, isso representa uma economia de 9.807 kWh no período de um ano. Assim, o consumo total do edifício foi de 168.436 kWh como mostra a Figura 7.40, onde é apresentado um consumo mensal para os casos considerando o sistema de VAV e sem considerar o mesmo.

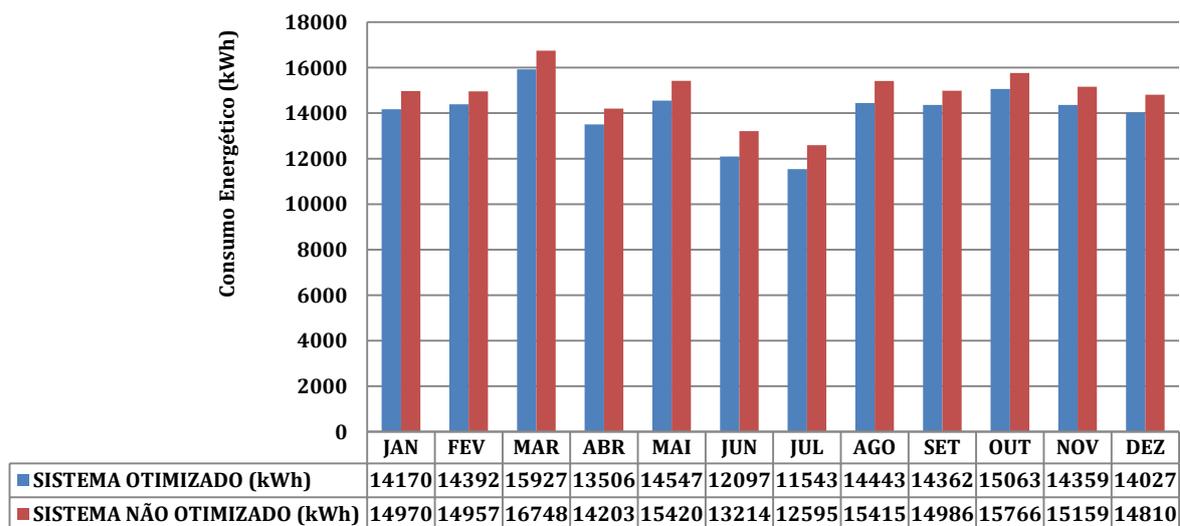


Figura 7.40 - Consumo mensal do edifício para os casos com e sem a otimização.

Neste caso, o principal componente responsável pela redução de consumo são os ventiladores, o que já era esperado, visto que a função do sistema VAV é permitir que os ventiladores empregados para induzir vazão de ar nos dutos, variem sua frequência quando o sistema detecta que não há necessidade de que o mesmo trabalhe em uma rotação mais elevada.

Em termos absolutos, o consumo deste equipamento caiu de 22.832 kWh por ano para 9.463 kWh. A figura 7.40 apresenta um gráfico comparando o consumo de ventiladores para o sistema com e sem a estratégia de VAV.

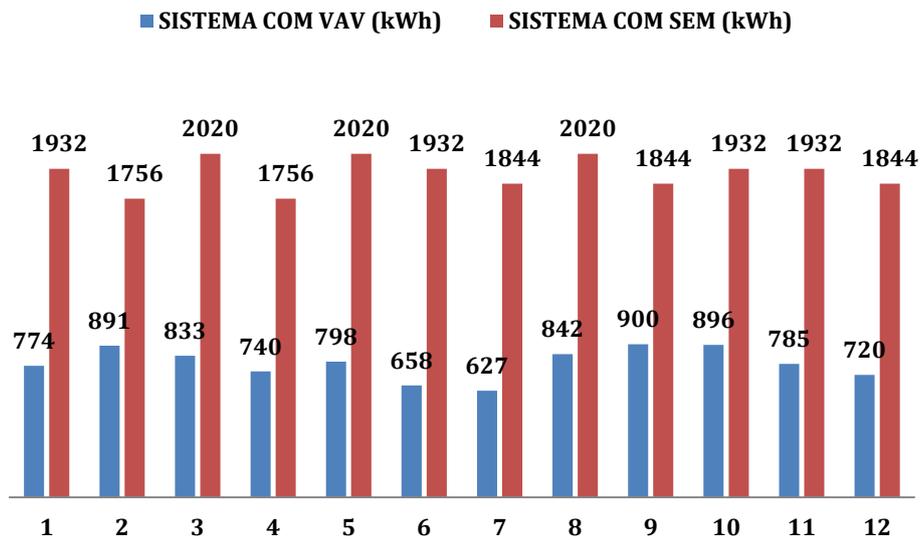


Figura 7.41 - Consumo do componente ventilador para os dois caso de análise.

7.4.3 Chiller com Condensação Água

7.4.3.1 Torre de Resfriamento

Para aplicação de uma solução de climatização com expansão indireta onde se pretende utilizar um *chiller* com condensação água, deve se projetar um sistema que disponibilize a água que irá resfriar o condensador do *chiller*. Atualmente, o que se faz é adicionar ao sistema uma planta de água onde estarão presentes uma bomba, para bombear este fluído da unidade condensadora do *chiller* para uma torre de resfriamento; um dispositivo capaz de dissipar o calor rejeitado da água proveniente da unidade condensadora.

As torres de resfriamento podem ser de vários tipos. A Figura 7.42 abaixo apresenta os componentes básicos desse equipamento, bem como um esquema de funcionamento do mesmo. A unidade mostrada abaixo é dita unidade unicelular (apenas uma célula). Um sistema pode conter várias estruturas como a apresentada abaixo, dando origem a uma torre de resfriamento multicelular.

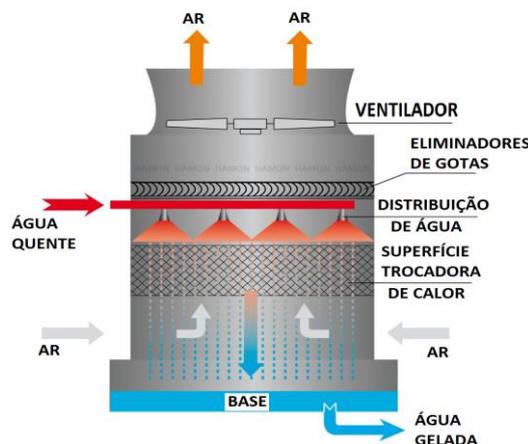


Figura 7.42 - Esquema de funcionamento e os componentes de uma torre de resfriamento.

O funcionamento deste equipamento se da seguinte forma: a água quente da condensadora do *chiller* é bombeada para porção superior da torre. Neste local, a água quente irá ser dispersa sobre superfícies trocadoras de calor, por onde ao mesmo tempo, será induzida por um ventilador, uma corrente de ar externo, á temperatura ambiente. Sobre essa superfície trocadora de calor dois processos ocorrerão: o primeiro deles uma troca de calor latente entre a água e o ar. Essa troca de calor latente irá causar uma evaporação da água, gerando, portanto, um fluxo de massa para fora do sistema. Esse é um dos motivos pelo qual, se posiciona na parte superior da torre eliminadores de gotas, os quais nada mais são do que superfícies aletadas responsáveis por captar esse vapor e diminuir a perda de água do sistema. O outro processo de transferência de calor e a troca de calor sensível que ocorre devido à diferença de temperatura existente entre os fluídos; no caso, ar e água. Sabe-se que o processo de troca de calor latente e responsável por dissipar cerca de 80% do calor contido no volume de água que adentra a torre, enquanto que os 20% restantes são dissipados no processo de troca de calor sensível.

Para um melhor entendimento físico do processo é importante se ter em mente os conceitos de temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. Note que a temperatura de bulbo úmido é menor ou no máximo igual à temperatura de bulbo seco. Quando se tem uma corrente de ar não saturado, ou seja, com uma umidade relativa menor que 100%, parte da água que entra em contato com o ar irá evaporar (troca de calor latente). Ao transferir massa para o ar (passagem da fase líquida para fase gasosa) a água se resfriará. Essa descrição como visto acima, explica parte do resfriamento da água. A outro parte do resfriamento é gerada, como mencionado pela simples diferença de temperatura entre a água e o ar.

7.4.3.2 Simulação

Em termos de configuração o sistema utilizado para implementação do *chiller* com condensação a água e bem similar ao sistema apresentado acima para o *chiller* com condensação ar. As diferenças são duas: primeiro deve-se substituir o *chiller* por condensação ar por um com condensação a água. A segunda e principal diferença é que deve ser implementado uma planta de água (planta de condensação), a qual; como visto acima, requer uma bomba, e uma torre de resfriamento.

A modelagem da planta de condensação com a torre de resfriamento está apresentada na Figura 7.43.

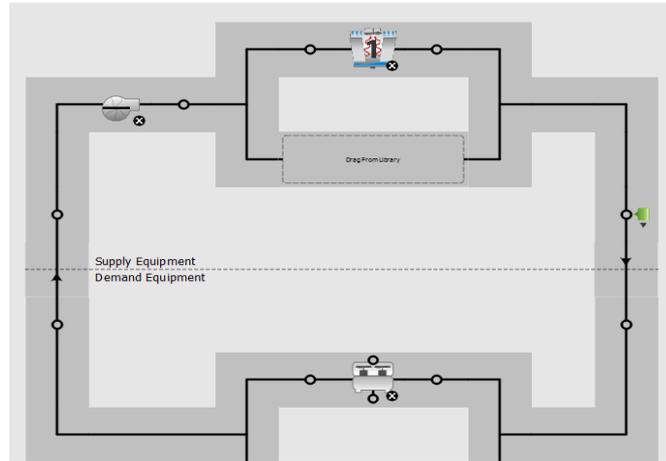


Figura 7.43 - Modelagem da planta de condensação.

A Tabela 7.7 apresenta os componentes utilizados na modelagem da planta de condensação.

Tabela 7.7 - Componentes utilizados na planta de condensação.

	Torre de resfriamento
	Bomba com vazão constante
	Termostato para água
	Chiller com condensação a água

O chiller utilizado desta vez foi um *Trane RTWA* de 383kWde capacidade com compressor parafuso e condensação á água. Alguns dados relativos à modelagem desse equipamento no sistema se encontram descritos na Tabela 7.8 e

Tabela 7.9.

Tabela 7.8 - Dados técnicos do chiller com condensação a água utilizado no modelo.

<i>Chiller - Trane RTWA</i>	
Capacidade Térmica[TR]	108,6
COP	4,17
Regime mínimo de operação	25%
Regime de operação de eficiência ótima	50%
Temperatura de saída da água gelada	7,0°C
Temperatura de entrada do ar para condensação	29,44°C

Tabela 7.9 - Parâmetros considerados para simulação da planta de condensação.

Torre de resfriamento de velocidade simples	
Número de células	1
Temperatura de entrada da água (T_e)	33,5
Temperatura de saída da água(T_s)	29,44
Temperatura de bulbo úmido (T_{bu})	26,7

Approach ($T_s - T_{bu}$)	6,3
Range ($T_{bu} - T_s$)	4,06

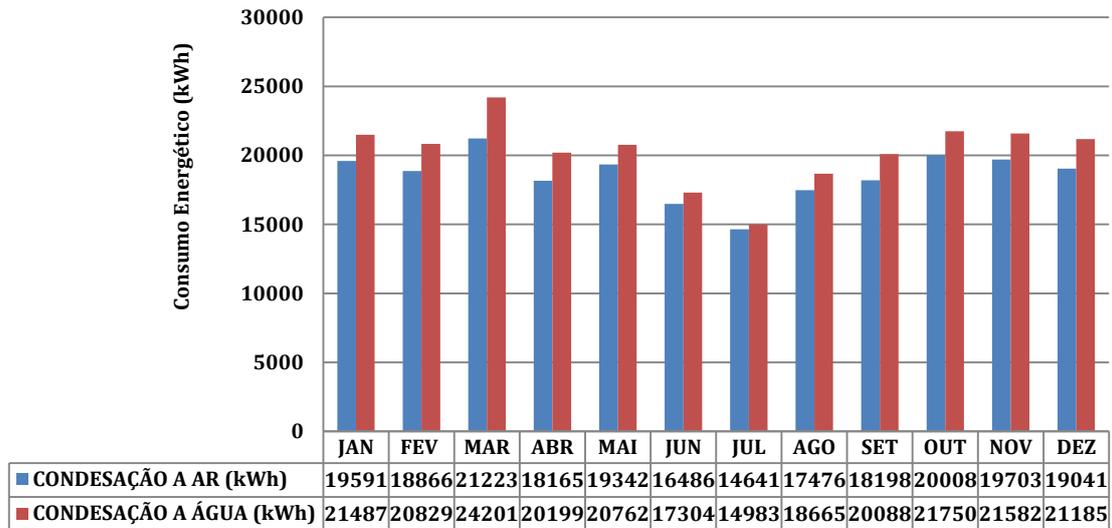


Figura 7.44 - Comparativo de consumo energético do edifício considerando o uso de *chiller* com condensação a ar e com condensação a água.

7.4.3.3 Resultados

Os resultados do consumo mensal para o edifício considerando um sistema com *chiller* com condensação a água é comparado na figura abaixo com o consumo energético do edifício considerando o *chiller* com condensação a ar.

A Figura 7.44 mostra que a central de água gelada empregando o *chiller* com condensação a água apresenta em todos os meses do ano um consumo maior quando considerado em projeto o *chiller* com condensação a ar. A Figura 7.45 apresenta o consumo por componentes utilizando como unidade resfriadora de líquido um *chiller* com condensação a água. Note que o gasto energético da torre de resfriamento representa 1% do total consumido.

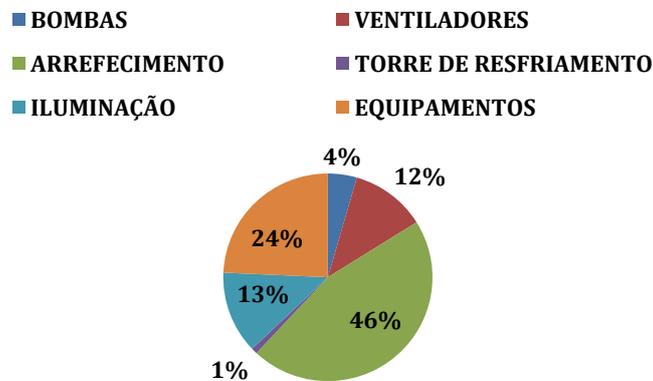


Figura 7.45 - Consumo por componente.

Além do desempenho do equipamento com condensação a água não se mostrar melhor que o *chiller* com condensação a ar, ele requer para o seu funcionamento apropriado dois novos componentes como visto acima: uma bomba para bombear água para a torre de resfriamento e ventiladores utilizados na torre para induzir a corrente de ar sobre a água a ser resfriada. Esses dois componentes irão gerar um aumento de consumo total do edifício. Além disso, esse tipo de sistema requer cuidados diferenciados, relativos ao controle de qualidade da água da planta de condensação. A Figura 7.46 apresenta um comparativo entre o consumo mensal do componente bomba, para os dois casos.

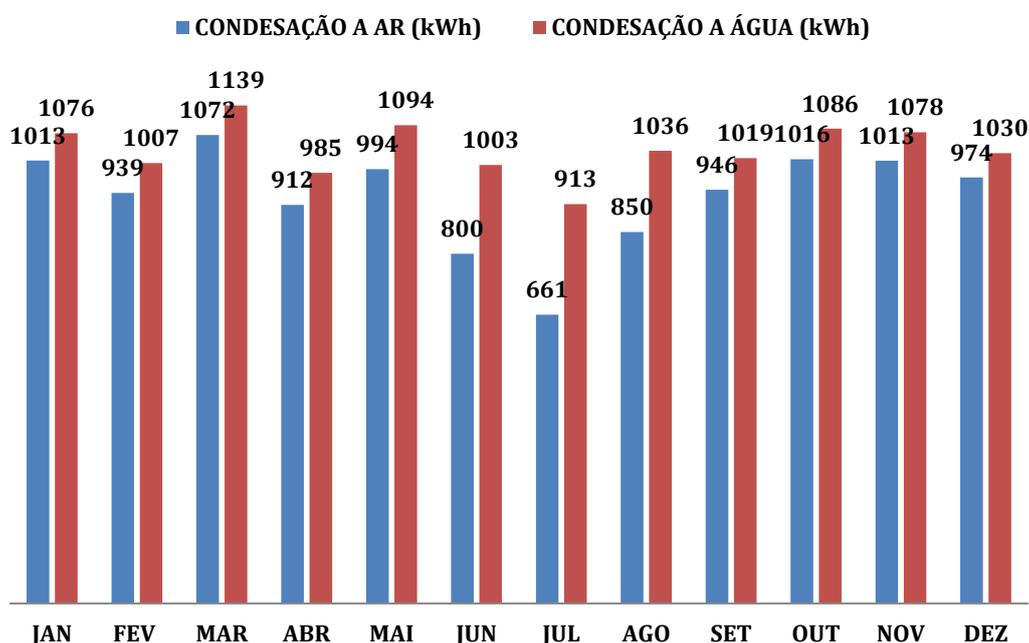


Figura 7.46 - Consumo do componente bomba para os dois sistemas de analisados.

A necessidade de uma nova planta de condensação neste tipo de sistema acarreta um aumento no consumo das bombas, visto que essa nova planta necessita deste equipamento para o seu correto funcionamento.

7.5 Sistema de Climatização por Expansão Direta

7.5.1 Sistema de Climatização com *Variable Refrigerant Flow* (VRF)

Este tipo de sistema é considerado um sistema de expansão direta por não envolver o uso de um fluido secundário no processo de tratamento do ar. O sistema é basicamente composto por uma unidade condensadora e uma evaporadora. Um fluido refrigerante utilizado no processo irá ser

submetido a um ciclo de compressão a vapor com o objetivo de gerar no sistema o efeito de arrefecimento. O VRF é composto por uma ou mais unidades condensadoras ligadas a múltiplas unidades internas, evaporadoras, operando individualmente por ambiente, ou por um sistema de dutos onde por meio do qual o ar tratado e insuflado. Esse controle individual é possível graças à variação à vazão de fluido refrigerante nas serpentinas das unidades evaporadoras.

O sistema VRV tem sido amplamente difundido em projetos de ar condicionado e sua eficiência tem melhorado a cada dia. Além disso, o sistema tem como atrativo o fato de ser compacto e menos complexo do ponto de vista técnico se comparado a outras soluções disponíveis.

As discussões quanto ao seu uso face às soluções que utilizam água gelada são grandes. Os projetistas do mercado não tem uma regra fixa para em que caso adotar uma a outra solução. Cada situação deve ser avaliada e ponderada. Dessa forma, um dos principais fatores a serem considerados é o com eficiente este sistema se mostra quando comparado ao um sistema que utiliza água gelada.

7.6 Simulação

Visando simular e analisar o comportamento termoenergético do edifício nZEB, implementou-se um sistema de expansão direta do tipo VRF. Para esse caso específico, adotou-se o uso de um unidade condensadora por pavimento de cada bloco, totalizando um total de 8 unidades. Uma unidade evaporadora foi localizada em cada ambiente climatizado e ligada à respectiva unidade condensadora de seu pavimento. A Tabela 7.10 traz os componentes utilizados para simular o sistema de VRF no software *EnergyPlus*.

Tabela 7.10 - Componentes utilizado na modelagem do sistema VRF.

	Unidade Condensadora
	Dutos de Fluido Refrigerante
	Unidade Evaporadora
	Zona Térmica

A figura 7.48 apresenta a modelagem do sistema no *software*.



Figura 7.47 - Modelagem do sistema VRF.

7.6.1 Resultados

Os resultados do consumo mensal para o edifício considerando um sistema de expansão direta do tipo VRF está apresentado na Figura 7.49.

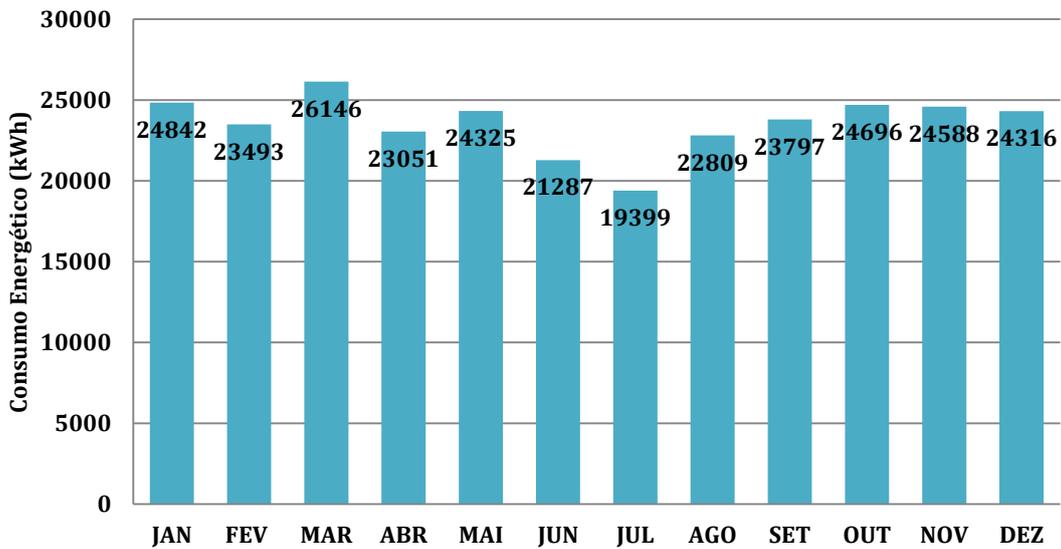


Figura 7.48 - Consumo energético mensal considerando o sistema VRF.

O consumo total do edifício para este caso de análise foi de 282.732 kWh.ano. Este consumo é 21,6% superior em relação ao consumo do edifício utilizando um sistema de água gelada com *chiller* de condensação a ar (considerando o sistema de água gelada não otimizado). Em termos de consumo anual por área, esta solução apresentou um resultado de 120 kWh/m².ano, uma razão alta se considerado como referência os valores da Tabela 7.1.

A Figura 7.49 apresenta o consumo por componentes para esta solução de climatização. Note que este sistema não possui bombas como o sistema de água gelada.

■ ARREFECIMENTO (kWh) ■ VENTILADORES (kWh)
■ ILUMINAÇÃO (kWh) ■ EQUIPAMENTOS (kWh)

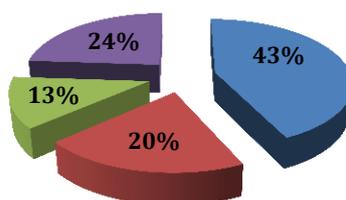


Figura 7.49 - Consumo por componente do edifício nZEB.

Note que o consumo do sistema de climatização (Arrefecimento + Ventiladores) representa 63% do consumo total da edificação.

Mesmo apresentados resultados de conforto térmico dentro das faixas aceitáveis pela *ASHRAE 55-1*, os resultados demonstram que o uso de VRF para edificação não se apresenta como uma boa solução a ser considerada, pois em nenhum mês do ano ela conseguiu ser mais eficiente que o sistema de água gelada, seja utilizando um *chiller* com condensação ar ou água.

7.7 Sistema Híbrido

7.7.1 Considerações

Após a análise de várias soluções e otimizações para os diversos sistemas estudados, foi pensando um sistema que contemple as soluções que se mostraram mais eficientes do ponto de vista energético, e que foram capazes de gerar bons resultados de conforto térmico segundo especifica a norma *ASHRAE 55-1*.

Assim sendo, foi proposto um sistema de climatização ativa que mescle dois dos sistemas acima utilizados:

1. O sistema de resfriamento evaporativo do ar;
2. O sistema de expansão indireta com o emprego dois *chillers* sequenciados, sistema de renovação de ar utilizando *free cooling* e ventiladores com variação de frequência (sistema VAV);

7.7.2 Resultados

Os resultados de consumo energético considerando a proposta de climatização acima citada estão apresentados nas Figura 7.50, Figura 7.51e Figura 7.52.

Consumo Energético Mensal (kWh)

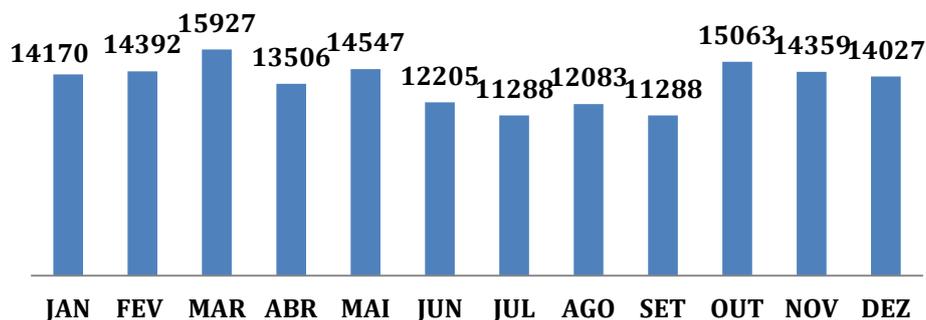


Figura 7.50 - Consumo mensal total para do edifício nZEB.

O consumo energético total considerando a proposta de climatização acima descrita foi de 162.854 kWh. Sendo assim, a razão consumo energética para esse resultado foi de 69,6 kWh/m².ano. A Tabela 7.11 apresenta agora o valor obtido para a proposta de arquitetura atualizada contemplado a nova proposta de climatização.

Tabela 7.11 –Consumo de energia por área de diversos edifícios.

Edifício	Média do consumo energético (kWh/m ² .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 (Teixeira, 2015)	69,60
nZEB–UnB (Pinto,2014)	48,54

Uma das explicações para esse aumento na razão de consumo por área é a redução de área do modelo atualizado, o qual contava com uma área de 3280 m², contra 2340 m² do modelo atual. O ponto é que a redução de área de um modelo em relação ao outro se deu exatamente em áreas que não eram climatizadas, como áreas comuns de circulação. Dessa forma, ao se fazer a razão de consumo por área, o consumo era diluído em um montante de área não climatizado bem maior, se comparado ao

modelo atualizado. Assim sendo, está razão pode ser tomada como um valor de referência, mas não como uma premissa para se afirmar que a nova proposta é menos eficiente. Pelo contrário: considerando que o valor área climatizada se manteve em relação à proposta original, pode-se dizer que ambas são igualmente eficientes.

As Figura 7.51e Figura 7.52 apresentam, respectivamente, os resultados de consumo absoluto e relativo para cada componente da proposta nZEB.

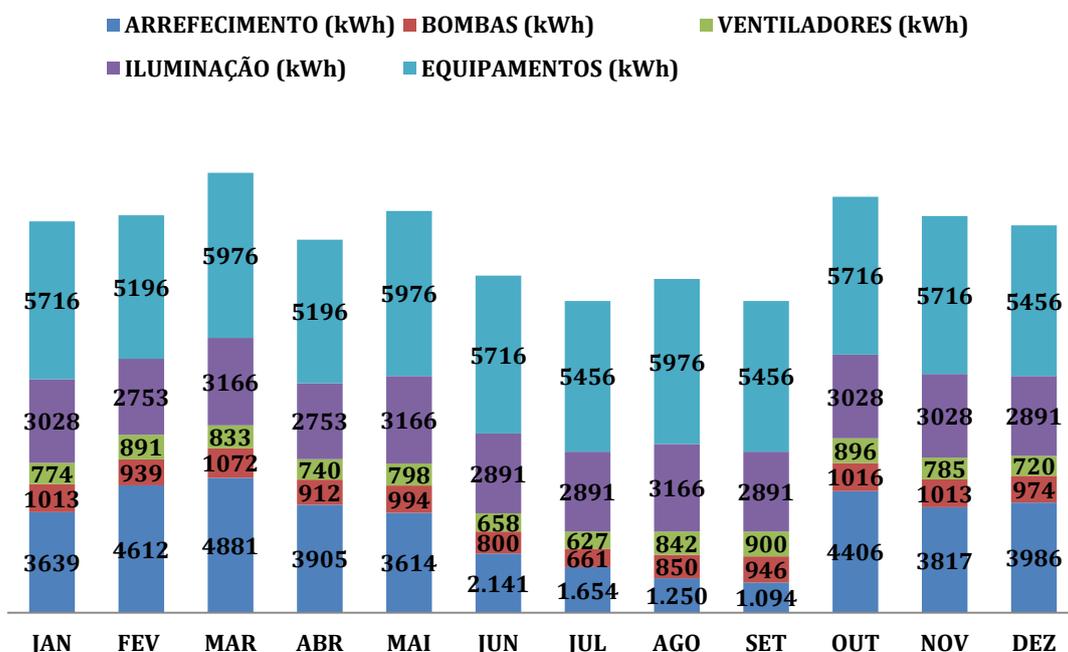


Figura 7.51 - Consumo mensal por componente.

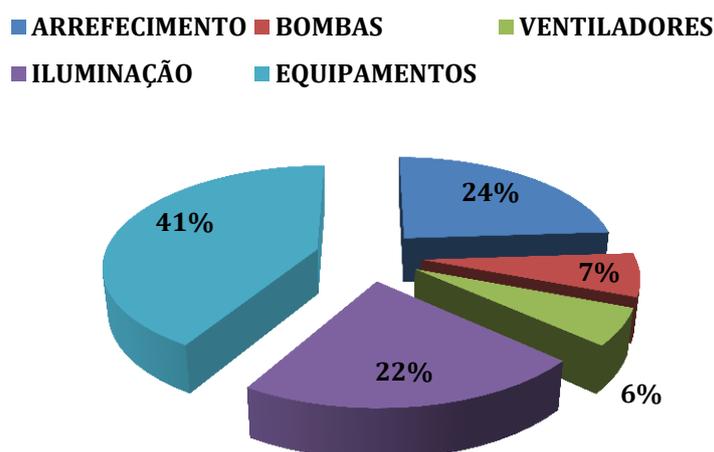


Figura 7.52 - Consumo relativo de cada componente.

Note que o consumo com climatização é inferior ao consumo de equipamentos, representando 37% do consumo total da edificação.

7.7.3 Impacto ambiental

O impacto ambiental do sistema de climatização foi avaliado com respeito ao uso de fluídos refrigerantes. Para avaliar o impacto ambiental dos fluidos empregados nos *chiller* de condensação a ar dois conceitos foram utilizados:

1. Potencial de destruição da camada de ozônio (*Ozone depletion potential – ODP*). Este índice mostra qual é o dano que uma substância pode causar à camada de ozônio, em relação ao CFC-11 ou R11. O ODP do R11 é igual a 0, a referência da escala. Esse índice varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de zero, menor o impacto na camada de ozônio.
2. Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*). Este índice mostra o quanto uma determinada massa de um gás de efeito de estufa contribui para o aquecimento global (ou qual a sua capacidade de reter calor na atmosfera), em relação a mesma massa de gás equivalente de CO₂. O gás de referência para o cálculo é CO₂, sendo que o seu GWP é 1 por definição. Quanto maior o GWP, maior o impacto sobre o aquecimento global.

O gás utilizado nos *chillers* CGAM52 é o R410A. Seu ODP é igual 0, o que significa dizer que essa substância não possui danos sobre a camada de ozônio. Já seu GDP é igual a 1890, o que seu potencial de contribuição para o aquecimento global é elevado.

8 SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E O BALANÇO ENERGÉTICO

Este capítulo visa apresentar informações técnicas utilizadas no processo de simulação de geração de energia elétrica bem como a análise de viabilidade do balanço energético nulo.

8.1 Metodologia

Para simular a geração de energia no edifício foi utilizado o *software System Advisor Model (SAM)* disponibilizado pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*.

Este programa disponibiliza simulação do potencial de geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos, energia eólico, energia geotérmica e também energia advinda de biomassa. Para o caso do edifício nZEB a simulação foi feita considerando a utilização de painéis fotovoltaicos. Como dados de entrada, o software requer parâmetros climáticos locais, os quais são fornecidos em um arquivo climático. Assim como no trabalho de Pinto (2014) arquivo climático utilizado foi o fornecido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. O motivo de se escolher este arquivo está no fato do mesmo conter as piores condições de insolação para o local em questão.

Em sua interface o software ainda apresenta a possibilidade de se configurar a capacidade do sistema calculada, a perda no conversor de corrente contínua para alternada, o número de eixos articulados no painel escolhido e as configurações de desempenho térmico do sistema. Os parâmetros de entrada utilizados foram os mesmos utilizados por Pinto (2014) e são apresentados na Figura 8.1.

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

Figura 8.1 - Dados técnicos do painel fotovoltaico utilizado por Pinto (2014).

Os dados apresentados acima são do painel fotovoltaico modelo N245, da *Panasonic*, o mesmo modelo utilizado por Pinto (2014) em seu trabalho.

O último parâmetro necessário para a simulação de geração de energia é a capacidade total do sistema. Ela foi obtida avaliando a eficiência do sistema em relação à área efetiva de painéis fotovoltaicos. A área efetiva considerada foi a metade da área total da cobertura. Sendo assim, calculou-se a capacidade total por meio da Equação 1.

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

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

$$Capacidade\ total\ [kW] = 1128[m^2] \times \left[\frac{kW}{m^2} \right] \times \frac{19,4[\%]}{100} \quad (1)$$

$$Capacidade\ total = 109,42\ kW$$

A Figura 8.2 apresenta a interface do programa onde foram inseridos os parâmetros necessários para simulação energética.

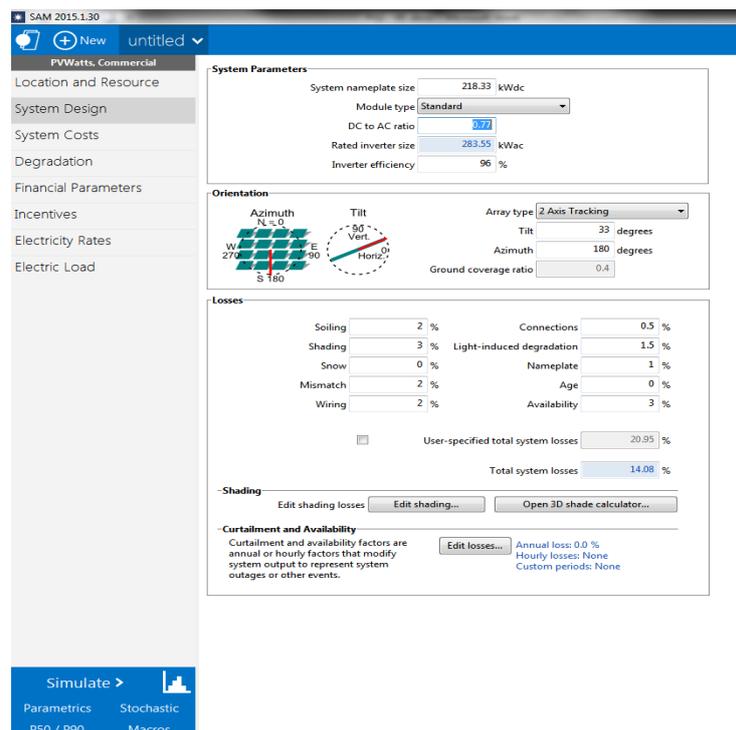


Figura 8.2 - Interface do SAM para entrada de dados.

8.2 Resultados

O resultado foi uma geração anual 206 MWh de energia elétrica. Para todos os meses do ano o sistema foi capaz de gerar energia elétrica suficiente para suprir seu consumo energético do prédio.

Os resultados mostram um bom potencial de geração de energia elétrica, visto que nem toda área disponível da cobertura foi considerada na simulação. Entretanto, estes resultados não são suficientes no sentido de que um estudo mais aprofundado deve ser realizado. Este estudo deve ter como objetivo a otimização dos processos inseridos em um sistema de geração de energia utilizando painéis fotovoltaicos.

8.3 Balanço Energético

Em face dos resultados de consumo energético obtidos com as simulações termoenergéticas realizadas no *software EnergyPlus* e dos resultados obtidos no *SAM*, relativos a geração de energia elétrica, foi possível a verificação do balanço energético nulo para a proposta apresentada. De fato, o consumo apresentado pelo edifício nZEB é inferior em 21,36% a energia elétrica gerada no mesmo. A Figura 8.3 apresenta um gráfico do balanço energético comparando a proposta atual do edifício nZEB (Teixeira, 2015) com a proposta apresentada no trabalho desenvolvido por Pinto (2014).

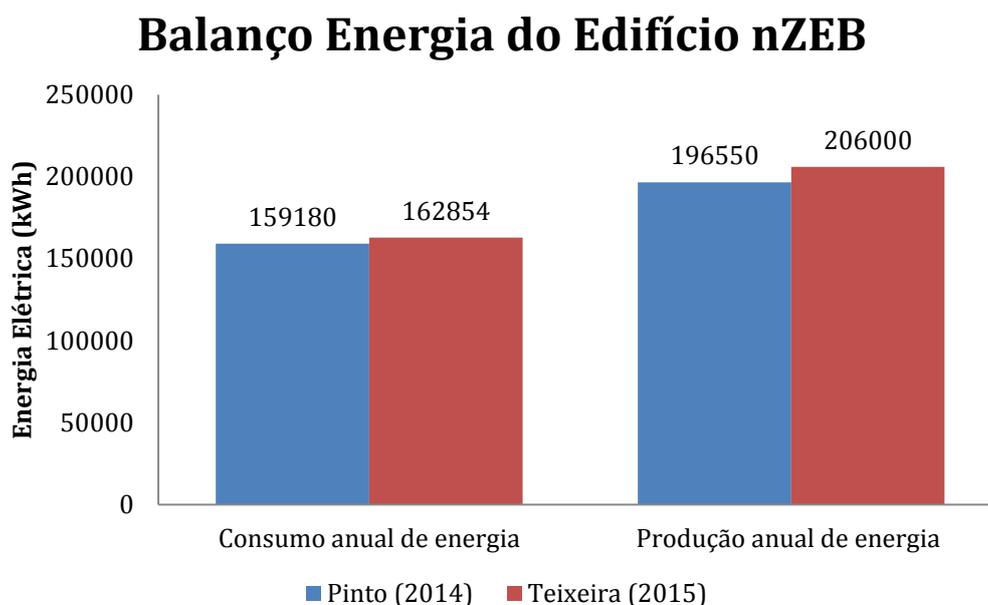


Figura 8.3 - Balanço de energia do edifício nZEB.

Note que o consumo energético da nova proposta é superior à proposta antiga, e de aproximadamente 2,3%. Por outro lado, a produção de energia se apresentou superior para a nova proposta, aproximadamente 4,6%.

9 CONCLUSÃO

Comparativamente, o edifício atualizado apresentou um consumo de energia superior à proposta original apresentada no trabalho de Pinto (2014), não sendo essa diferença, no entanto, um valor muito significativo, aproximadamente 2%.

O sistema de *free cooling* utilizado na renovação de ar do sistema HVAC se apresentou como uma boa estratégia de redução do consumo energético devido ao impacto causado na redução de consumo de dois componentes do sistema de água gelada, além da grande redução no consumo dos ventiladores com a utilização de caixas VAV no sistema de insuflamento de ar, as quais por sua vez permitiram uma redução no consumo dos ventiladores.

O sequenciamento de *chillers* se mostrou uma interessante solução para a composição do sistema de água gelada, na medida em que permitiu que fosse explorado o potência máximo de cada equipamento, fazendo com que os mesmos atuassem em condições de alta performance energética.

O índice de PMV dos ambientes climatizados com o sistema de resfriamento evaporativo apontou esta solução como uma boa alternativa de climatização em determinadas épocas do ano, especialmente nos meses de inverno onde este sistema foi capaz de atender os ambientes gerando níveis de conforto aceitáveis pela norma *ASHRAE 55-1*. Vale ressaltar o baixo consumo deste tipo de solução ativa, é por isso seu grande potencial na busca por eficiência energética em sistemas HVAC.

Vale ressaltar, que apesar de consumir mais energia que a solução proposta, os sistemas VRF e o sistema com expansão indireta utilizando um *chiller* com condensação á água foram capazes de gerar o devido conforto térmico nos ambientes climatizados.

Vale notar que a nova proposta não possui estratégias de climatização passiva como as adotadas no trabalho de Pinto (2014). Mesmo assim, buscou-se eficiência energética em dois níveis: em primeiro lugar nos sistemas instalados e em segundo lugar nos componentes empregados na composição dos sistemas analisados. Essas duas abordagens foram combinadas de forma a se obter um sistema híbrido de climatização ativa empregando conceitos de eficiência e equipamentos eficientes. Ambas as abordagens são igualmente importantes e apesar de tomarem caminhos diferentes possuem o mesmo objetivo final: a busca por eficiência energética.

Por fim, concluiu-se que o balanço energético nulo foi atingido e por tanto o ideal nZEB foi alcançado. O edifício é capaz de gerar 21% a mais de energia elétrica do montante total consumido. Sendo assim, é possível que se utilize menos painéis fotovoltaicos do que o previsto nos cálculos de análise do potencial de geração de energia.

BIBLIOGRAFIA

ABNT. NBR 16401. 2008. Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários – parte 1 (projetos das instalações) – parte 2 (parâmetros de conforto térmico) e parte 3 (qualidade do ar interior). Rio de Janeiro, 2008.

Aeleneia, L. e Gonçalves, H. 2014. From solar building design to Net Zero Energy Buildings: performance insights of an office building. SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, September 23-25, 2013, Freiburg, Germany. Vol. 48, pp. 1236-1243. 2014.

Afonso, C. e Oliveira, A. 2000. Solar chimneys: simulation and experiment. Energy and Buildings, v. 32, n. 1, p. 71-79, Jun. 2000.

Aneel. [Online][Citado em: 01 de Novembro de 2009] - www.aneel.gov.br/

ASHRAE. 1993. Handbook of Fundamentals. New York: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1993.

Allard, Francis. 1998. Natural Ventilation in Buildings – A Design Handbook. London, James e James, 1998.

Alves, H. F. N. (2011). Eficiência Energética em Edifícios da Lipor 1. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Porto. Julho de 2011.

Arce, J. et al. 2012. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. Renewable Energy, v. 34, n. 12, p. 2928-2934, Dec. 2009.

Bansal, N. K., Mathur, R. e Bhandari, M. S. 1994. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. Building and Environment, v. 29, n. 4, p. 495-500, Oct. 1994.

Balcomb, J. D. et al. 1993. “Passive Solar Design Handbook” Vol I, II, III and supplement. American Solar Energy Society, New York, USA, 1993.

Bauer, L. A. F. 1994. Materiais de Construção. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 2 v.

Birck, Márcia. 2014. Apresentação do projeto arquitetônico de edificação experimental nZEB para a UnB. 2014.

Camargo, J.,R.. 2003. Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2003.

Camargo, J.,R..2003. Sistema de resfriamento evaporativo-adsortivo aplicadas ao condicionamento de ar. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

Costa, Ennio C. da. Física aplicada à construção: conforto térmico. 3. ed. revisada. e ampliada. São Paulo: E. Blücher; c1974. 260 p.

Carvalho, C. M.2008. Simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas. Universidade de Aveiro. Departamento de engenharia Mecânica. 2008.

Cheikh, H. B. e Bouchair, A. 2004. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. *Renewable Energy*, vol. 29, pp.1877–1886.2004.

Chiasson, A. D..*Advances in modeling of Ground-Source Heat Pump Systems.Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State Univesity.*1999.

Eletrobras. 2014. [Online][Citado em: 21 de Agosto de 2014].<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp>

EPE. 2013. [Online][Acessado em: 24 de setembro de 2014] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf

Ferreira, Ana Rute Carvalho dos Santos. 2012. Estudo de Soluções de Otimização Para Edifício de Balanço Energético Nulo. Lisboa. 2012.

Flores, J. L. O. 2009. Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Agosto de 2009.

Gagliano, A., Patania, F., Ferlito, A., Nocera, F. e A. Galesi. 2001. Computational Fluid Dynamic Simulations of Natural Convection in Ventilated Facades. Department of Industrial and Mechanics Engineering, Faculty of Engineering, University of Catania, Italy.2001

Gonçalves, Helder e Graça, João M. 2004. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal. Lisboa, Novembro. 2004.

Gonçalves, H. 2005. Edifício Solar XXI: Um edifício energeticamente eficiente em Portugal. Brochura de apresentação do Edifício Solar XXI, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Lisboa, 2005.

Gonçalves, H., Rodrigues, C. e Aelenei, L. 2012.SOLAR XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building. s.l. : REHVA Journal, 2012.

Green Bulding Council (GBC). [Online][Citado em 29 de Outubro de 2014]. www.gbcbrasil.org.br/?p=certificacao

Herke, S., Kagerer, F. 2011.Advances in housing retrofit. Task 37 – Advanced Housing Renovation with solar and conservation. Freiburg. 2011.

Imessad, K., Derradji, L., Messaoudene, N. A., Mokhtari, F., Chenak e Kharchi, R. 2014.Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate, *Renewable Energy*, Vol. 71, pp. 589-597.2014.

INOVATECH, [Online]. 2014.[Acessado em: 29 de outubro de 2014]. www.inovatech engenharia.com.br/breem/.

Kavanaugh, S.P., K. Rafferty. 1997. Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, Chap. 3. Atlanta: ASHRAE.

Khedari, J. et al. 2000. Field measurements of performance of roof solar collector. *Energy and Buildings*, v. 31, n.3, p. 171-178, Apr. 2000.

Marques da Silva, F. V. 2003. Ventilação natural de edifícios: turbulência atmosférica. Tese (doutorado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2003.

Mascaró, Lúcia R. 1991. Energia na Edificação – Estratégias para minimizar seu consumo. São Paulo, 1991.

Mendoça, Paulo J. F. A. U. 2005. Habitar sob uma segunda pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

Mitjá, A., Esteve, J., Escobar, J.J. 1986. Estalvi d'energia en el disseny d'edificis. Generalitat de Catalunya / Departament d'Indústria i Energia, Barcelona, 1986.

Moldovan, M. D., Visa, I., Neagoe, M. e Burduhos, B G. 2013. Solar heating & cooling energy mixes to transform low energy buildings in nearly zero energy buildings. SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. September 23-25, 2013, Freiburg, Germany. 2013.

Neves, Leticia de Oliveira. 2012. Chaminé Solar como Elemento Indutor de Ventilação Natural em Edificações. Campinas, SP : s.n., 2012.

Oliveira, J. T., Hagishima, A. e Tanimoto, J. 2009. Estimation of passive cooling efficiency for environmental design in Brazil, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No 8, pp. 809-813. 2009.

Orosa, J. A. e Oliveira, A. C. 2009. Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 41 , No 8, pp. 823-828. 2009.

Patterson, M. G. 1996. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues, *Energy Policy*, v. 24, 1996.

Pinto, G. S. P. 2014. Proposta de uma edificação experimental com balanço energético nulo para Universidade de Brasília. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. 27 de Junho de 2014.

Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D. 2010. *Sizing Calculation Spreadsheet – Vertical Geothermal Borefields*. *Ashrae Journal*.

PROCELINFO. 2014. [Online][Citado em: 25 de Agosto de 2014]. <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp?View={89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3}>

PROCELINFO. [Online]. [Citado em: 26 de Agosto de 2014]. <http://www.procelinfo.com.br>

POLICS. [Online]. [Acessado em 29 de Setembro de 2014]. http://www.iclei.org.br/polics/CD/P1/4_Lev_Inst_Certificacao/PDF7_Certificacoes_Port_27abr11.pdf

Santamouris, M. e Kolokotsa, D. 2013. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*. Vol. 57, pp.74-94.

Siqueira, Eduardo Maroco. 2011. Projeto do Envoltório de um Prédio com Energia Líquida Zero (PELZ). Porto Alegre : UFRGS, 2011.

Tessaro, A. R., Souza, S. M. N. De, Ricieri, R. P. e Ferruzi, Y. 2006. Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar. 2006.

Toledo, E. 1999. Ventilação natural das habitações. Maceió: EDUFAL, 1999.

Chiasson, A. D.. *Advances in modeling of Ground-Source Heat Pump Systems.* Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University. 1999.

Toledo, Alexandre. 2001. Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios. In: ENCAC, VI., 2001, São Pedro, SP.

Torres, Rafael Gerson. 2011. Projeto de um prédio de energia líquida zero (PELZ) com foco nos sistemas. Porto Alegre : s.n., 2011.

USPdigital.[Online][Acessado em: 26 de setembro de 2014].https://uspdigital.usp.br/tycho/CurriculoLattesMostrar?codpub=E7A0B0E9226E#PP_ZER
O ENERGY BUILDINGS; O CASO DO EDIF% C3% 8DCIO CECAS –

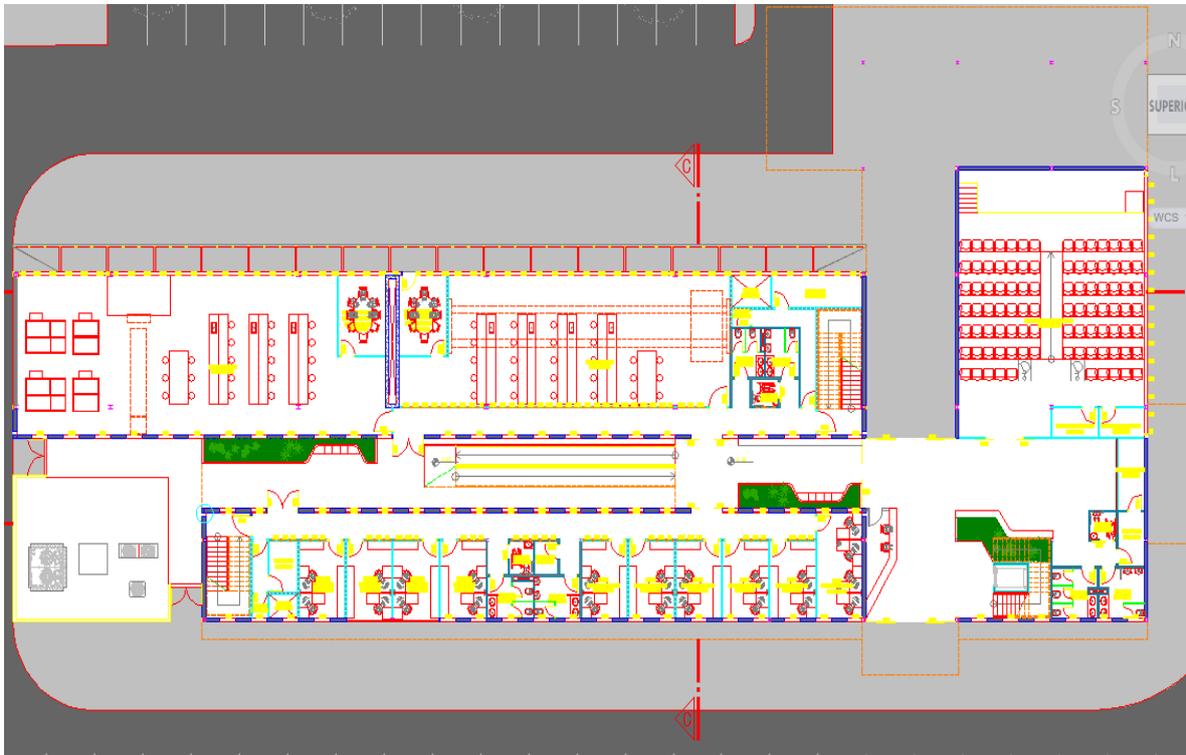
Vallêra, A. M. 2006. [Online][Acessado em: 10 de outubro de 2014].<http://solar.fc.ul.pt:www.solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>

Wang, Z., Yi, L. e Gao, F. 2009. Night ventilation control strategies in office buildings, *Solar Energy*. Solar Energy, Vol. 83, pp. 1902–1913. 2009.

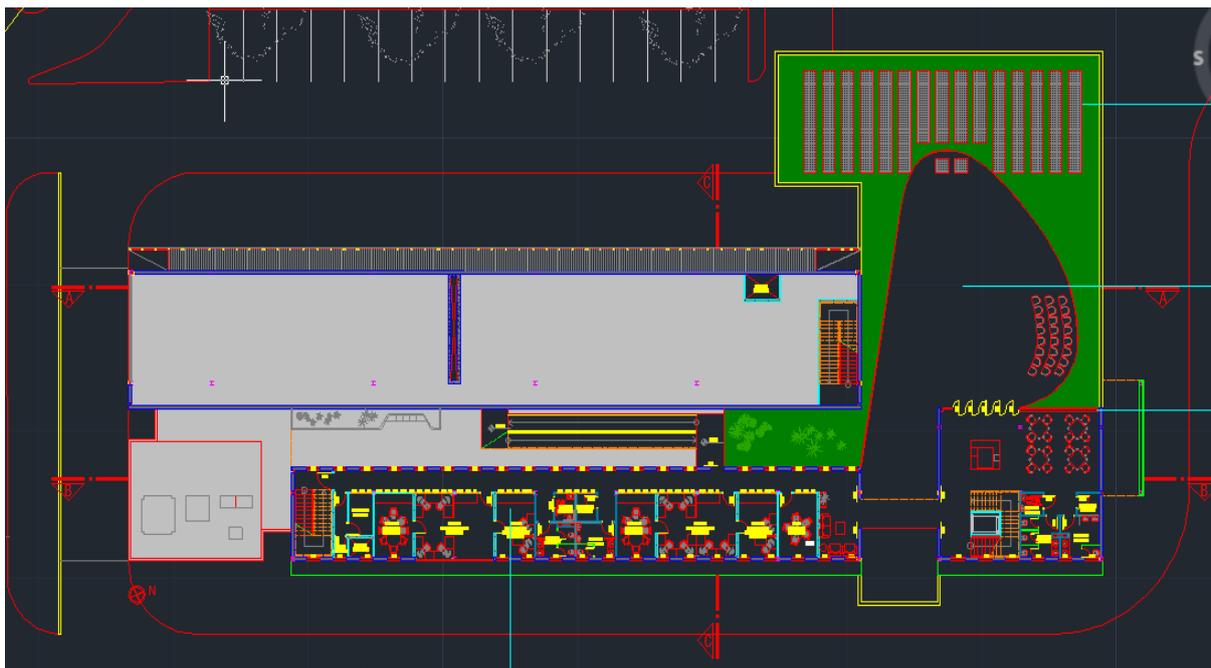
Yannas, S., Maldonado, E., Adnot, J. e Krainer, A. 1995. Designing for Summer Comfort : Heat Gain Control and Passive Cooling ff Buildings : A European Handbook from the EU Pascool Project. Architectural Association Graduate School, Londres, 1995.

ANEXOS

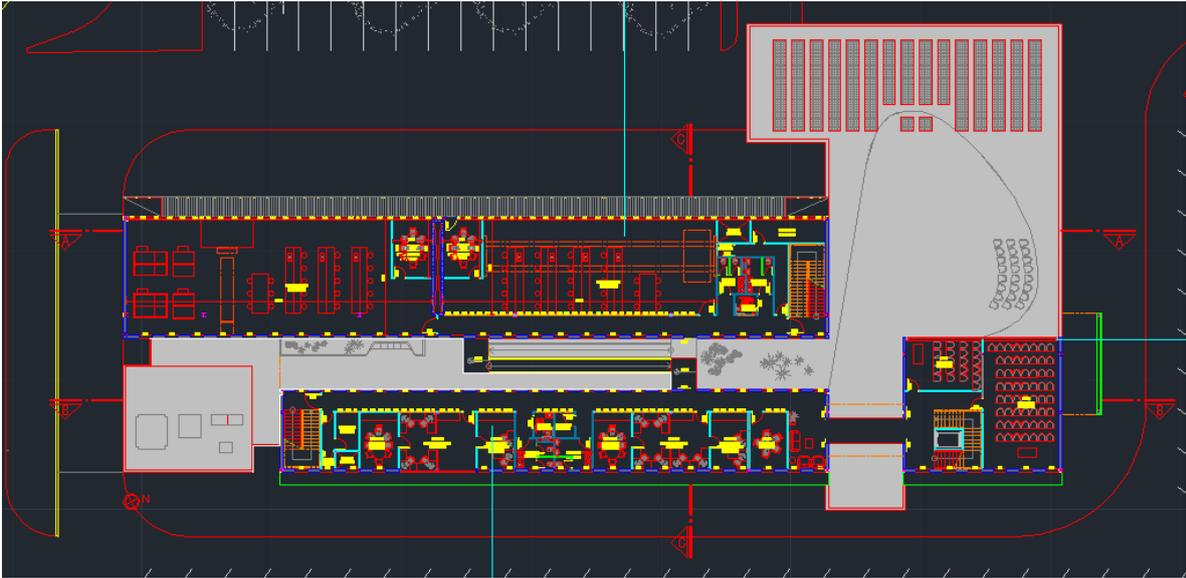
ANEXO I - Plantas baixas da edificação nZEB proposta pela FAU (Térreo)



ANEXO II - Plantas baixas da edificação nZEB proposta pela FAU (1º Pavimento)



ANEXO III - Plantas baixas da edificação nZEB proposta pela FAU (2º Pavimento)



ANEXO IV – Catálogo Chiller CGAM52



General Data

Table 2. General data - 60 Hz - high efficiency - SI

Size	20	26	30	35	40	52	60	70	80	90	100	110	120	130
Compressor														
Number #	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
Tonnage/ckt ^(a)	10+10	13+13	15+15	15+20	10+10	13+13	15+15	15+20	20+20	20+25	25+25	25+30	30+30	20+20 +25
Evaporator														
Water storage (l)	5.3	8.3	8.3	12.1	9.1	15.5	18.9	28.4	26.5	34.1	39.0	43.5	43.5	46.6
Min. flow (l/s)	1.8	2.3	2.6	3.1	3.6	4.6	5.3	6.3	7.2	8.1	9.1	9.9	10.7	11.6
Max. flow (l/s)	4.4	5.6	6.3	7.4	8.6	11.1	12.7	15.1	17.4	19.4	21.9	23.7	25.7	27.8
Water connection (mm)	50.8	63.5	63.5	63.5	76.2	76.2	76.2	76.2	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Condenser														
Round Tube and Plate Fin Coils														
Qty of coils #	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
Coil length (mm)	2311	2311	3226	3226	2311	2311	3226	3226	3073	3073	3658	3658	3658	4572
Coil height (mm)	1727	1727	1727	1727	1727	1727	1727	1727	1067	1067	1067	1067	1067	1067
Number of rows #	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
Fins per foot (fpf)	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192
Microchannel Coils														
Quantity of coils #	1	1	1	1	2	2	2	2	8	8	8	8	8	8
Coil length (mm)	2311	2311	3226	3226	2311	2311	3226	3226	1727+ 1168	1727+ 1168	1727+ 1727	1727+ 1727	1727+ 1727	1727+ 2642
Coil height ^(b) (mm)	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	1067+ 254	864+ 178	864+ 178	864+ 178	864+ 178	864+ 178	864+ 178
Tube width (mm)	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4
Fan														
Quantity #	2	2	3	3	4	4	6	6	4	6	8	8	8	10
Diameter (mm)	732	732	732	732	732	732	732	732	732	732	732	732	732	732
Airflow per fan (m ³ /h)	15993	16005	15577	15585	15993	16005	15577	15585	16090	16093	15451	15454	15458	15451
Power per motor (HP)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Motor RPM (rpm)	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Tip speed (m/s)	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
General Unit														
Refrig circuits #	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Capacity steps %	50-100	50-100	50-100	43-100	25-50- 75-100	25-50- 75-100	25-50- 75-100	21-43- 71-100	25-50- 75-100	22-44- 72-100	25-50- 75-100	23-45- 73-100	25-50- 75-100	15-31- 46-62- 81-100
Min ambient - wide (°C)	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18
Min ambient - high (°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Min ambient - extreme low (°C)	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9	-28.9
Round Tube and Plate Fin Coils														
Refrig charge/ckt ^(a) (kg)	14.5	15.4	20	21.8	14.5	14.5	20	21.8	33.6	35.4	40.8	39	39	50.8
Oil charge /ckt ^(a) (l)	6.6	6.6	7.2	13.4	6.6	6.6	7.2	13.4	13.4	13.4	13.4	13.9	14.4	22.0
Microchannel Coils														
Refrig charge/ckt ^(a) (kg)	8.3	8.8	11.4	12.4	8.3	8.3	11.4	12.4	16.8	17.7	20.4	19.5	19.5	25.4
Oil charge /ckt ^(a) (l)	5.4	5.4	5.9	11.0	5.4	5.4	5.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.4	11.8	18.0

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).

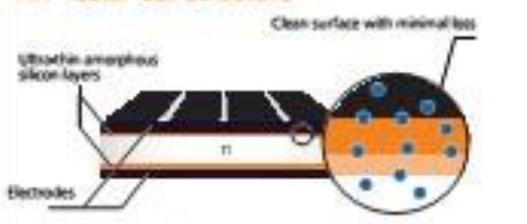
Special features

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

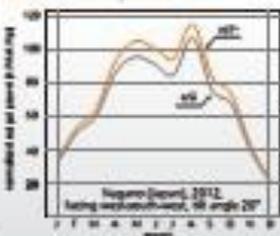



Figure (Source: 2012, being weather-based, 40 angle 20°)

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