

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE CASO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E CONTROLE DE QUALIDADE
DO AR INTERIOR EM AMBIENTE
CONDICIONADO**

Por,

Marcelo Cintra Martins

Brasília, 22 de Junho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DE CASO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONTROLE DE QUALIDADE DO AR INTERIOR EM AMBIENTE CONDICIONADO

POR,

Marcelo Cintra Martins

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

Banca Examinadora

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

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, UnB/ ENM

Eng. Matheus Valverde Sodré (Câmara dos Dep.)

Brasília, 22 de Junho de 2018

Agradecimentos

Primeiramente a todas as decisões conscientes ou não, minhas ou de terceiros que me guiaram até o momento.

Aos meus pais Ildebrando José Pereira Martins e Consuelo Cintra Rosa Martins pelo amor incondicional, pelo apoio em todas as fases da minha vida e por sempre priorizar educação durante meu crescimento.

Ao Prof. Dr. João Manoel Dias Pimenta pelo constante acompanhamento, disposição e orientação para realização deste trabalho.

Ao Eng. Geraldo Pithon, por ter expandido meu campo de visão e por todo o auxílio técnico ministrado em curso que possibilitou minha análise neste relatório.

Ao Eng. Matheus Sodré Valverde, por viabilizar minha experiência prática e por disponibilizar sua dissertação de mestrado que me conduziu durante este projeto.

Ao Prof. Dr. Taygoara Felamingo de Oliveira que através de grande esforço, fez como coordenador do curso um excelente trabalho em prol dos estudantes.

À minha namorada Natália Miranda de Barros por todo amor dedicado, por me oferecer constante incentivo e sempre me apoiar.

E a toda equipe da secretaria da Universidade de Brasília que de alguma forma auxiliou durante minha graduação.

Muito obrigado,

Marcelo Cintra Martins

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso sobre eficiência energética e controle de qualidade do ar interior (QAI) de sistema de ar condicionado com tecnologias de vazão de ar exterior variável (DCV), recuperação de energia (ERV) e free cooling no plenário Ulysses Guimarães, Brasília - DF. Uma simulação computacional com auxílio dos softwares OpenStudio e Energyplus acerca do sistema de climatização em estudo foi realizada para analisar o potencial de economia na utilização de recursos como ERV, DCV e free cooling. Para tal, foram consideradas condições climáticas locais, características arquitetônicas do plenário, bem como as eficiências dos equipamentos utilizados. Paralelamente, foi realizada uma avaliação da qualidade do ar interior e possíveis soluções de monitoramento. Os resultados mostraram que a combinação das tecnologias avaliadas foi capaz de proporcionar economias de até 20% nos custos operacionais do sistema de ar condicionado em ambientes que apresentam perfil de ocupação variável.

***Palavras-chave:** Eficiência energética, Recuperação de energia, Qualidade do ar interior, Vazão de ar variável, VCD, Free cooling.*

ABSTRACT

The objective of this work is to perform a case study on energy efficiency and indoor air quality control (IAQ) of air conditioning system with variable outdoor airflow (DCV), energy recovery (ERV) and free cooling technologies in plenary Ulysses Guimarães, Brasília DF. A computer simulation with the help of the OpenStudio and Energyplus software on the air conditioning system under study was performed to analyze the potential savings in the use of resources such as ERV, DCV and free cooling. For this, local climatic conditions, architecture characteristics of the plenary, as well as the efficiencies of the equipment used were considered. At the same time, an indoor air quality assessment and possible monitoring solutions were carried out. The results showed that the combination of the technologies evaluated was able to provide savings up to 20% in the operating costs of the air conditioning system in environments with variable occupancy profiles.

***Keywords:** Energy efficiency, Energy recovery, Indoor air quality, Variable air flow rate, DCV, Free cooling.*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA.....	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.3	OBJETIVOS	8
1.4	METODOLOGIA.....	8
1.5	ESTRUTURA DO RELATÓRIO	9
2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	11
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	11
2.2	PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	12
2.3	PROGRAMAS DE CERTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS.....	14
2.3.1	LEED	14
2.3.2	Procel Edificações.....	16
3	CLIMATIZAÇÃO E QUALIDADE DO AR.....	17
3.1	QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	17
3.1.1	Visão geral	17
3.1.2	Fatores que afetam a QAI.....	18
3.2	VAZÃO DE AR EXTERIOR	18
3.2.1	ABNT NBR 16401-3/2008(Parte 3: Qualidade do ar interior)	19
3.3	SISTEMAS E EQUIPAMENTOS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA.....	21
3.3.1	Visão geral	21
3.3.2	Heat recovery ventilators - HRVs	22
3.3.3	Energy recovery ventilators - ERVs.....	23
3.4	FREE COOLING.....	24
4	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO	27
4.1	DESCRIÇÃO	27
4.2	AMBIENTE CONDICIONADO	29
4.3	SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.....	29
4.4	DISPOSITIVO CONTROLE DE VAZÃO DE AR EXTERIOR.....	31
4.5	DISPOSITIVO RECUPERADOR DE ENERGIA	32
5	ESTUDO DE CASO	33
5.1	PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES	33

5.2	CÁLCULO CARGA TÉRMICA.....	34
5.2.1	Cidade de projeto	35
5.2.2	Estrutura física.....	36
5.2.3	Envoltória	38
5.2.4	Perfil de ocupação	38
5.2.5	Sistema de climatização	40
5.2.6	Perfil de carga térmica	41
5.3	VAZÃO DE AR EXTERNO.....	43
6	RESULTADOS.....	44
6.1	RESULTADOS CENÁRIOS PROPOSTOS	44
6.1.1	Cenário 1: Solução convencional (atual)	44
6.1.2	Cenário 2: Solução com controle de vazão de ar exterior	45
6.1.3	Cenário 3: Solução convencional com dispositivo ERV	47
6.1.4	Cenário 4: Solução conjunta.....	49
6.1.5	Cenário 5: Solução com free cooling associado à vazão variável.....	51
6.2	COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS.....	53
6.3	CONTROLE DA QUALIDADE DO AR INTERIOR POR CO ₂	55
7	CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
7.1	CONCLUSÕES.....	61
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	APÊNDICES.....	68
	A.1 Relatório de cálculo EnergyPlus	68
	B.1 Especificações dispositivos na Simulação (ERV).....	71
	B.2 Especificações dispositivos na Simulação (Chiller).....	72
	B.3 Especificações dispositivos na Simulação (Torre de resfriamento)	74
	B.4 Especificações dispositivos na Simulação (Ventilador)	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 EXEMPLO DE ETIQUETA PARA EDIFICAÇÃO COMERCIAL, DE SERVIÇO E PÚBLICA (PROCEL, 2006)	14
FIGURA 2.2 EXEMPLO DE ETIQUETAS DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS (PROCEL, 2009)	14
FIGURA 3.1 MODELO ESQUEMÁTICO DISPOSITIVO HRV (BARRIE, 2016)	22
FIGURA 3.2 MODELO ESQUEMÁTICO DISPOSITIVO ERV (ZHOU ET AL, 2007)	23
FIGURA 3.3 MODELO ESQUEMÁTICO CIRCUITO FREE COOLING (KOPKO E RUDIO, 2017)	25
FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE SISTEMA DE CHILLER A AGUA (XIAO LI ET AL, 2012)	27
FIGURA 4.2 MODELO ESQUEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO COM SUBSISTEMAS INDICADOS (OPENSTUDIO)	28
FIGURA 4.3 MODELO ESQUEMÁTICO <i>FAN COIL</i> AVAC (DESIGNBUILDER, 2017)	30
FIGURA 4.4 MODELO ESQUEMÁTICO CICLO FREE COOLING (OPENSTUDIO)	31
FIGURA 4.5 MODELO DE VENTILAÇÃO DILUIDORA (PIMENTA, 2016)	32
FIGURA 5.1 CONGRESSO NACIONAL (UVB, 2016)	33
FIGURA 5.2 PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES (HOJELIVRE, 2014)	34
FIGURA 5.3 TEMPERATURA DE BULBO SECO PARA UM ANO TÍPICO EM BRASÍLIA	36
FIGURA 5.4 UMIDADE RELATIVA DO AR PARA UM ANO EM BRASÍLIA	36
FIGURA 5.5 VISTA ISOMÉTRICA PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES (PRUDENTE, 2017)	37
FIGURA 5.6 VISTA LATERAL PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES (MANSANO, 2013)	37
FIGURA 5.7 VISTA SUPERIOR PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES	38
FIGURA 5.8 PERFIL DE OCUPAÇÃO SEMANAL	39
FIGURA 5.9 VISTA SUPERIOR DA REDE DE DUTOS (BRASIL, 2017)	41
FIGURA 5.10 VARIAÇÃO DE CARGA TÉRMICA TOTAL AVALIADA PARA CADA HORA DE UM ANO TÍPICO	42
FIGURA 5.11 PERFIL DE CARGA TÉRMICA SEMANAL	42
FIGURA 6.1 MODELO ESQUEMÁTICO CENÁRIO 1 (VALVERDE, 2016)	44
FIGURA 6.2 VARIAÇÃO CARGA TÉRMICA ANUAL CENÁRIO 1	45
FIGURA 6.3 MODELO ESQUEMÁTICO CENÁRIO 2	46
FIGURA 6.4 COMPARAÇÃO CARGA TÉRMICA SEMANAL CENÁRIO 1 E 2	46
FIGURA 6.5 DIFERENÇA CARGA TÉRMICA ANUAL ENTRE CENÁRIO 1 E 2	47
FIGURA 6.6 MODELO ESQUEMÁTICO CENÁRIO 3 (VALVERDE, 2016)	48
FIGURA 6.7 COMPARAÇÃO CARGA TÉRMICA SEMANAL CENÁRIO 1 E 3	48
FIGURA 6.8 DIFERENÇA CARGA TÉRMICA ANUAL ENTRE CENÁRIO 1 E 3	49
FIGURA 6.9 MODELO ESQUEMÁTICO CENÁRIO 4	50
FIGURA 6.10 COMPARAÇÃO CARGA TÉRMICA SEMANAL CENÁRIO 1 E 4	50
FIGURA 6.11 DIFERENÇA CARGA TÉRMICA ANUAL ENTRE CENÁRIO 1 E 4	51
FIGURA 6.12 MODELO ESQUEMÁTICO CENÁRIO 5	52
FIGURA 6.13 COMPARAÇÃO CARGA TÉRMICA SEMANAL CENÁRIO 1 E 5	52
FIGURA 6.14 DIFERENÇA CARGA TÉRMICA ANUAL ENTRE CENÁRIO 1 E 5	53
FIGURA 6.15 CONSUMO ANUAL DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	54
FIGURA 6.16 CARGA TÉRMICA DE PICO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	54
FIGURA 6.17 PERFIL OCUPACIONAL DIA TÍPICO	57
FIGURA 6.18 CONCENTRAÇÃO CO ₂ DIA TÍPICO	58
FIGURA 6.19 AR EXTERNO NECESSÁRIO DIA TÍPICO	58
FIGURA 6.20 CONCENTRAÇÃO CO ₂ PARA UMA SEMANA	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Características do ambiente escolhido.....	35
Tabela 5.2 – Perfil de ocupação semanal típico para aplicação de plenário após consulta ao local em %	39
Tabela 5.3 – Parâmetro para cálculo vazão eficaz (ABNT NBR 16401-3, 2008)	43
Tabela 6.1 – Comparação de cenários	55
Tabela 6.2 – Características do ambiente escolhido.....	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

O crescimento populacional contínuo, bem como a busca incessante por desenvolvimento e tecnologia, está diretamente relacionado ao aumento do consumo energético. Atualmente, o grande desafio é a busca pela eficiência energética, visto que estamos sujeitos às mudanças climáticas que podem influenciar a produção e o consumo de energia. Outro aspecto muito importante é a redução dos impactos ambientais, é necessário que a geração de energia e a redução de impactos ambientais permaneçam juntas durante o desenvolvimento.

A área de estudo relacionada à eficiência energética leva em consideração aspectos ambientais e sócio-econômicos para desenvolvimento de novas tecnologias. A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. Para tal, fontes de energias renováveis são o foco de estudo para matrizes energéticas futuras. Entretanto, para uma solução eficaz à demanda de energia, a maneira com que a utilizamos deve ser eficiente.

O consumo de energia está em constante crescimento tanto em países em desenvolvimento como em países desenvolvidos. Entretanto, os países que compõem o segundo grupo são caracterizados por uma economia estável e uma produção industrial bem estabelecida não possibilitando mudanças bruscas no volume energético. Já os países em desenvolvimento estão sujeitos a tendências econômicas, políticas e investimentos externos, tornando este grupo de países mais suscetível a mudanças e conseqüentemente mais dependente.

A vida útil de um projeto de edifício comercial é cerca de 50 anos e seu custo total é dividido majoritariamente em construção 14% e 80% de uso e operação (CEOTTO, 2008). Tendo em vista esses dados, podemos perceber que medidas a longo prazo impactam fortemente na economia energética.

Segundo resenha do Balanço Energético Nacional (BEN, 2015) o consumo de energia elétrica em edificações representa 50% da demanda brasileira. Portanto, existe uma grande preocupação em relação ao seu uso, pois o impacto de se aumentar a eficiência energética neste ramo, resultaria em uma grande economia. Para tal finalidade existem inúmeras normas e padrões nacionais e internacionais com o intuito de minimizar os gastos operacionais em edificações.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é um programa de governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME e executado pela Eletrobrás que tem como objetivo incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais nas edificações brasileiras, reduzindo o desperdício e os impactos sobre o meio ambiente. O PROCEL tem incentivado ações não apenas para o uso de equipamentos mais eficientes, como também para o desenvolvimento

de projetos e utilização de práticas visando o combate ao desperdício e o incremento da eficiência energética nessas edificações públicas.

Segundo dados da Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil ANO BASE 2005 (ELETROBRAS, PROCEL, 2009), as principais fontes de consumo energético domiciliar são chuveiro 24%, geladeira 22% e condicionamento ambiental 20%. Percebe-se que grande parte do consumo está relacionado a refrigeração e climatização ambiental, área de grande potencial de crescimento da eficiência energética.

Semelhantemente, grande parcela da participação de consumo energético do setor comercial refere-se ao condicionamento ambiental. A participação média do ar condicionado neste tipo de edificação corresponde a 47% do consumo de energia elétrica. Em grandes instalações comerciais como supermercados, hospitais e shopping centers, a presença de equipamentos de refrigeração e climatização são ainda mais evidentes, podendo chegar em alguns casos a uma participação energética de 70% segundo Panesi (2008). Assim como o setor comercial, edifícios públicos exigem grande demanda energética para climatização, visto que essa parcela representa 48% do total consumido.

Edificações que fazem uso de climatização artificial são foco da implementação de medidas que visam à eficiência energética, visto que possuem um grande potencial de economia. Soluções de climatização tais como resfriamento evaporativo, ventilação forçada e sistemas de expansão indireta são constantemente estudadas com o intuito de minimizar os custos operacionais de sistemas de climatização artificial.

Além das soluções citadas, outro critério de extrema importância é a operação de sistemas em cargas térmicas parciais. O que torna possível sistemas capazes de modular seu funcionamento de maneira eficiente, não sendo necessária atuação em carga máxima em condições favoráveis.

Uma proposta muito importante, assim como a operação em cargas parciais, é a implantação de recuperadores de energia em sistemas de climatização. O recuperador é um dispositivo com a finalidade de recuperar energia térmica de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), reduzindo os custos de operação do sistema.

Em casos de edifícios com ocupação de pessoas, existem alguns aspectos que devem ser levados em conta durante um projeto de climatização. Neste ambiente é necessário que o ar respirado pelos ocupantes seja de boa qualidade e que o conforto térmico seja estabelecido de forma eficiente. É desejado que o ambiente possua renovação de ar interior e recuperação térmica, visando o bem estar e a saúde dos ocupantes, bem como economia de energia. Ambientes fechados estão sujeitos a diferentes tipos de poluição, sendo elas o excesso de CO₂ ou até mesmo a presença de fungos e bactérias no local.

Associado ao controle de equipamentos de climatização está o caso de utilização em edifícios de ocupação variável. Desta maneira, as análises de renovação de ar associadas à recuperação de

energia em AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) são de fundamental importância quando se trata de eficiência energética.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O setor de edifícios comerciais está em constante busca por estratégias que possibilitam um aumento de eficiência energética, juntamente com um ambiente de trabalho saudável. Isto incentiva o uso de sistemas de climatização com recuperação de energia e renovação de ar por ventilação controlada por demanda.

A ventilação de ar externo, quando aplicável, é a condição mais simples para se obter Qualidade do Ar Interior (QAI). Em situações complexas onde este recurso não pode ser utilizado, como por exemplo no espaço, realiza-se a Reação de Sabatier, onde o oxigênio é produzido através da eletrólise da água. As atuais normas nacionais definem um valor mínimo de vazão de ar exterior e de nível de filtragem com o intuito de reduzir a concentração de contaminantes no ar interior, uma vez que este edifício está sujeito a ocupação de pessoas. A admissão de ar externo no local, implica em uma carga térmica adicional no sistema de climatização. Portanto, a eficiência energética em sistemas de AVAC está diretamente ligada aos requisitos de QAI (Perez-Lombard *et al.*,2011).

É sabido que este ar exterior inserido possui uma carga térmica e uma umidade que devem ser controladas. Quanto maior a taxa de renovação de ar, melhor será a qualidade do ar interior, em contrapartida, maior será o consumo de energia dos sistemas de climatização. Entretanto, em casos de cidades com elevada poluição, se faz necessário a utilização de filtros especiais capazes de reter a maior parte das substâncias nocivas. Dessa forma, o dimensionamento das vazões de ar exterior leva em consideração a área do espaço condicionado e o número de ocupantes, as taxas mínimas são estimadas considerando o ambiente em ocupação máxima. Portanto, é recomendável que os sistemas de AVAC possibilitem ajustes de modo que as taxas de ventilação possam ser controladas de acordo com a demanda, evitando renovação de ar excessiva (Perez-Lombard *et al.*,2011).

Gabel *et al* (1986) realizaram um estudo que envolveu uma análise do consumo de energia e níveis de poluentes no ambiente de pequeno edifício comercial. Este estudo experimental incluiu diversas medições durante as estações climáticas de primavera, verão e inverno. Foram realizados dois tipos de medições, em situações normais de operação e em seguida foi utilizada a metodologia de Ventilação Controlada por Demanda (VCD) para o controle de concentração de CO₂. O grupo concluiu que o sistema de controle operando em condições de concentração entre 1800 mg/m³ (100 ppm) e 2160 mg/m³ (1200 ppm) foi capaz de proporcionar a renovação de ar necessária para a ocupação média, que por sua vez era muito inferior para o qual o sistema de climatização havia sido projetado, cerca de 10% a 15%.

Segundo o estudo de Roth *et al* (2003) os reais níveis de ocupação dos edifícios comerciais dos Estados Unidos são significativamente menores em relação aos quais os sistemas de ar

condicionado são projetados. De acordo com suas análises, a ocupação deste setor de edificações pode chegar a ser 30% menor do projetado.

Dentre os principais processos de recuperação de energia em instalações de AVAC, pode-se destacar a recuperação térmica a partir do ar de exaustão. O ar externo adentra o edifício em condições climáticas externas e é exaurido aproximadamente nas condições internas. Este processo requer o uso de carga térmica de ventilação. A energia térmica do ar de exaustão pode ser utilizada para pré-aquecer ou resfriar o ar externo de renovação, proporcionando reduções na carga térmica devido à ventilação (Perez-Lombard *et al.*, 2011).

Os equipamentos que realizam este processo são chamados de recuperadores de energia ar-ar (*air-to-air energy recovery equipment*). Esses recuperadores de energia entre fluxos de ar podem ser divididos em dois grupos: i) sistemas de recuperação que transferem apenas calor sensível (*heat recovery ventilator - HRV*) e ii) sistemas de recuperação de calor e umidade que transferem tanto calor sensível quanto calor latente (*energy recovery ventilator - ERV*) (VALVERDE, 2016).

De acordo com *Health Canada* uma zona ótima de umidade relativa deve ser mantida num ambiente climatizado visando o bem-estar dos ocupantes. Esta zona é compreendida entre 30% e 55% de umidade relativa do ar. Segundo estudos, esta faixa representa um intervalo onde há uma menor presença de vírus e bactérias, assim como menor incidência de infecções respiratórias.

A escolha entre um sistema de HRV e de ERV leva em consideração o clima e as especificações do caso em estudo. Por exemplo, em casos onde o inverno é seco, a melhor opção é o ERV, visto que este dispositivo ajuda na retenção de umidade do ar insuflado para o ambiente interno. O oposto se faz verdade em casos onde o inverno é muito úmido já que sistemas com HRV auxiliariam a livrar-se do excesso de umidade do ar exterior.

Até meados de 2005, o principal foco de estudo de pesquisas estava relacionado apenas à recuperação de calor sensível, sendo desprezado o tratamento de umidade do ar da ventilação externa. Esses sistemas utilizam normalmente trocadores de calor tradicionais, como trocadores de placas fixas (*fixed plates*), rodas trocadoras de calor sensível (*sensible heat Exchange wheels*), tubos de calor (*heat pipes*) e trocadores de calor por meio de bombeamento de fluido em serpentina (*run-around loop heat exchangers*), os quais possuem fácil implementação (VALVERDE, 2016).

Normalmente, os recuperadores de energia são utilizados em Unidades de Tratamento do Ar (UTA), do inglês *Air Handling Unit* (AHU). Estes dispositivos são compostos por ventilador mecânico, elementos de aquecimento e arrefecimento, elementos de filtragem, atenuadores de ruído e grelhas de admissão e saída, e são usados para circulação de ar em toda a instalação a fim de atender aos requisitos de conforto e ventilação (PRUDENTE, 2017).

Dhital *et al* (1995) investigaram os efeitos de sistemas de trocadores de calor por meio de bombeamento de fluido em serpentina (*run-around heat exchangers*) no consumo de energia e na análise de custo do ciclo de vida (*life cycle cost analysis - LCCA*) de um edifício de escritórios. Foram

realizadas simulações em quatro cidades americanas e os resultados apresentaram economias anuais de energia de até 4,8%, associados à redução de até 8% na capacidade dos *chillers*.

Johnson *et al* (1995) estudaram um sistema de bombeamento de fluido em serpentina (*multiple-coil run-around system*) em diversas condições de operação, tanto em climas quentes com altas cargas térmicas até climas frios. Uma simulação anual foi realizada com base em informações de temperatura e umidade, onde foi possível determinar os custos de operação e as respectivas economias provenientes do uso do sistema proposto. Para o ambiente analisado, os sistemas de recuperação de energia sugeridos, demonstraram um retorno do investimento de aproximadamente 3,4 anos.

Atualmente, o foco de estudo se adaptou às necessidades e tem voltado sua atenção para a recuperação entálpica, recuperação de energia na qual tanto o calor sensível quanto o calor latente são recuperados. A principal técnica de recuperação de entalpia se baseia em processos de sorção alternada (absorção e adsorção) e regeneração, seja sob a forma de leitos cíclicos fechados (*cycling packed beds*) ou rodas giratórias, também conhecidas por rodas entálpicas (*Rotary wheels or Rotary enthalpy wheels*) (VALVERDE, 2016).

Simonson e Besant realizaram diversos estudos acerca de rodas entálpicas. Em 1998 apresentaram e validaram em experimento, um modelo numérico para análise de transferência de calor, umidade, condensação e congelamento em rodas entálpicas. Foram estudadas as sensibilidades aos processos de condensação e congelamento em rodas entálpicas com dois tipos de materiais dessecantes: i) com um tipo de sorção isotérmica como peneira molecular e ii) com sorção isotérmica linear como sílica gel. A presença de condensado e gelo aumenta com a umidade em certos níveis de umidade relativa do ar, se acumulando na roda entálpica. A simulação proporcionou resultados que mostraram o dessecante com curva de sorção linear ser mais favorável para a recuperação de energia, visto que possui menores quantidades de condensação e congelamento em condições de operação extremas.

Nasif *et al* (2005) realizaram um estudo acerca de um recuperador de energia ar-ar tipo Z que tem como superfície de transferência, papel. Foi avaliado experimentalmente o desempenho em termos de eficiência sensível e latente do recuperador. Um modelo computacional foi realizado para analisar a distribuição de calor e de umidade, posteriormente os resultados foram certificados experimentalmente por medições.

Rasouli *et al* (2010) estudaram a aplicabilidade e a otimização de uma estratégia de controle de sistemas de ERV em diferentes condições climáticas. Uma simulação com o intuito de determinar valores sensíveis e latentes com efetividade foi realizada para um edifício de 10 pavimentos. Os impactos da utilização do ERV no consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento foram analisados. Os resultados mostram que a recuperação de calor e umidade pode proporcionar uma redução significativa de consumo de energia anual para aquecimento, registrando acima de 40% de economia. Além disso, o dispositivo de ERV com a capacidade de recuperação de calor e umidade

pode proporcionar uma redução de 20% no consumo anual de energia em sistemas de resfriamento, caso corretamente controlado.

Rasouli *et al* (2013) realizaram um estudo acerca das incertezas das performances energéticas e econômicas de dispositivos ERV em sistemas de AVAC devido a incertezas de parâmetros do edifício e do sistema de AVAC. Os resultados ilustraram que um dispositivo de ERV com 75% de eficiência sensível e 60% de eficiência latente operando em um edifício comercial em Chicago pode diminuir o pico de aquecimento em 30% e o pico de resfriamento em 18%, além de reduzir o consumo de energia anual para aquecimento em 40% e para resfriamento em 8%. O estudo apresenta ainda que o retorno do investimento seria de apenas 2 anos. Uma incerteza de 25% nos 7 parâmetros do edifício ou parâmetros do sistema de AVAC resultam em uma incerteza de até 225% no período de *payback* de um ERV.

Yunqing Fan *et al* (2014) realizaram estudos de campo para investigar os efeitos de redução de consumo de energia a partir de ventilação controlada por demanda para CO₂ em escritório com aplicação de dispositivos de ERV. Foram feitas medições nas áreas ocupadas (0-1,8m) e no teto do ambiente do escritório localizado no Japão. Os resultados mostraram que com as aplicações de sistemas de ERV, o consumo de energia do sistema de ar condicionado poderia ser reduzido entre 20% até 30%, enquanto que com o sistema de ventilação, isto é, carga externa do ar, reduzir até 70%.

Peng Yang *et al* (2015) investigaram os benefícios de se utilizar *energy recovery ventilators* (ERV) em sistemas de ar condicionado. Foi verificado que a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo do edifício influencia na eficiência do recuperador de energia. Quanto maior a diferença de temperatura, maior a eficiência. Outro aspecto que influenciou na eficiência do recuperador de energia é a velocidade do vento, portanto, o tipo de edifício, bem como seu design é impactante. Resultados de economia de energia de até 34% foram obtidos durante o verão.

Valverde (2016) realizou um trabalho teórico com o objetivo de apresentar uma metodologia para análise da eficiência energética de sistemas de ar condicionado operando com tecnologias de recuperação de energia (ERV) e de vazão de ar exterior variável. Esboçou uma estratégia de controle para maximizar os efeitos da recuperação de energia através de uma modelagem matemática, capaz de simular o desempenho dessas técnicas em função dos parâmetros climáticos e perfis de ocupação.

Foi realizado um estudo de caso com a finalidade de se avaliar a metodologia proposta, onde se analisou a viabilidade econômica da utilização dos recursos de recuperação de energia e de vazão de ar exterior variável em um auditório localizado em Brasília – DF e em Manaus – AM. Como as cargas provenientes do ar exterior da cidade de Manaus são muito superiores à da cidade de Brasília, os efeitos das tecnologias propostas apresentaram resultados majorados. Enquanto em Brasília o retorno do investimento era pouco maior de três anos, em Manaus o retorno é inferior a um ano.

Concluiu-se que a implementação destas tecnologias nas duas cidades em questão apresenta economias energéticas distintas. O custo operacional dos sistemas de ar condicionado que atendem

ambientes com perfil de ocupação variável, apresentou economias energéticas anuais de 18% a 37% para a cidade de Manaus e de 12% a 30% para a cidade de Brasília.

Prudente (2017) através de uma modelagem matemática, capaz de simular teoricamente o desempenho de dispositivos de recuperação de energia (ERV) e de vazão de ar exterior variável em função das variações de parâmetros climáticos e perfis ocupacionais, apresentou uma análise de quatro possíveis cenários de aplicação das tecnologias de recuperação de energia e de vazão de ar exterior variável em um sistema de ar condicionado de uma edificação de Brasília - DF. O cenário com a presença apenas do recuperador de energia, apresentou resultados potenciais de 3% e 32%, entretanto é importante ressaltar que a eficiência do dispositivo ERV está diretamente ligada à vazão de ar exterior, que nesta análise foi considerada constante. No cenário composto pela junção entre as técnicas de recuperação de energia e vazão de ar exterior variável, os resultados obtidos foram entre 13% e 28%. É possível observar que os resultados neste cenário são relativamente menores que o anterior, pois há um controle das vazões médias que consequentemente são menores.

Kopko e Rudio analisaram em 2017 o impacto energético da utilização de uma combinação de chiller de temperatura elevada e de ventilador e compressor inteligente em operação de free cooling total ou parcial. O conceito free cooling consiste na utilização de vantagens climáticas momentâneas para auxiliar parcialmente ou totalmente o sistema de climatização de um ambiente. Em determinadas condições externas de temperatura e umidade, o ar externo pode ser utilizado para resfriar a água da serpentina de um fan coil, ou até ser utilizado diretamente para climatizar o ambiente, reduzindo assim o consumo elétrico demandado no chiller. O estudo mostra que novas tecnologias estão surgindo e estão cada vez mais eficientes, de forma que as condições climáticas são mais bem aproveitadas. O chiller de temperatura elevada com free cooling foi capaz de proporcionar uma economia de energia de até 60%, enquanto o chiller usual associado a uma serpentina para free cooling proporciona 25% de economia.

Palmiste e Voll realizaram em 2016 um estudo com o objetivo de analisar o potencial de free cooling direto em condições climáticas da Estônia. Foi desenvolvido um estudo climático para identificar os instantes os quais apresentavam condições potenciais para free cooling. Foram selecionadas três condições de operação, free cooling total, free cooling parcial e climatização mecânica. Verificou-se que durante o verão essa tecnologia seria mais eficiente de acordo com a temperatura do ar fornecido, de modo que quanto maior for a temperatura do ar que pode ser utilizado, maior será a eficiência, ou seja, uma maior quantidade de ar poderá ser utilizada. Durante as outras épocas do ano, essa característica não é tão predominante, não impactando significativamente na eficiência.

Anica Ilie *et al* (2017) realizaram um estudo comparativo sobre possíveis soluções técnicas e econômicas para aumentar a eficiência de um sistema de climatização em um edifício comercial localizado em Bucharest. A utilização de um sistema com trocador de calor apresentou resultados que em determinado mês pode chegar a uma economia de energia de até 34%. Além de eficiente

energeticamente, uma análise econômica também foi realizada e o retorno do capital investido para implantação desse sistema é de apenas dois anos.

Percebe-se que inúmeros trabalhos foram realizados acerca da utilização de sistemas de ERV, vazão variável de ar exterior e soluções de free cooling em aplicações de climatização. Entretanto, observa-se que estes sistemas são tratados separadamente. Além disso, existem dúvidas no que diz respeito à melhor metodologia de simulação e monitoramento no contexto proposto.

Os conhecimentos adquiridos de aplicações de recuperadores de energia, juntamente com os estudos desenvolvidos sobre vazões variáveis de ar externo, abrem a possibilidade de se analisar um modelo conjunto que aborde os dois tipos de sistemas, a fim de proporcionar maiores economias, bem como melhor controle de qualidade do ar interior, conforto térmico e eficiência energética. Adicionalmente a esses modelos, será analisada a aplicação da solução inteligente free cooling, capaz de promover uma maior economia de energia preservando a qualidade do ar.

Internacionalmente existem várias pesquisas que buscam simular a aplicação destas técnicas em casos reais. Vê-se a possibilidade de fazer uma análise operando em condições climáticas do Brasil, uma vez que existe uma ampla área de aplicação em edificações públicas e comerciais, considerando ainda, a qualidade do ar interior, respeitando as normas brasileiras.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho possui como objetivo principal conduzir estudos para investigar os efeitos das técnicas de recuperação de energia, de vazão de ar exterior variável e de free cooling, em um sistema de ar condicionado para conforto do plenário Ulysses Guimarães da Câmara dos Deputados, Brasília – DF. Tal trabalho será baseado principalmente em simulação computacional, que proporcionará dados para basear a instalação dessas técnicas no local.

A este objetivo principal, se associa ainda uma análise que busca mensurar a qualidade do ar interior no ambiente ocupado do plenário. Para tal, será apresentado um estudo acerca da metodologia de análise de dados relacionados à concentração de dióxido de carbono. Além de comparar a efetividade de diferentes soluções propostas pela norma ABNT NBR 16401 – 3/2008. Realizar um estudo de campo para identificar os locais nos quais os sensores de monitoramento serão instalados e quais sistemas de controle utilizar.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada será baseada, primeiramente, na elaboração de um planejamento de instalação dos sistemas de recuperação de energia, de controle de vazão de ar exterior por CO₂ e free cooling com water-side e air-side economizer. O plano proposto levará em consideração as condições

climáticas que o local está inserido, bem como a disponibilidade e o valor de mercado dos equipamentos.

O planejamento será realizado com base em um ambiente pré-estabelecido. Nesse ambiente será avaliada a instrumentação necessária para acompanhar o funcionamento do sistema de climatização, de controle de vazão de ar exterior e de recuperação de energia. Uma pesquisa acerca dos sensores disponíveis no mercado será realizada, bem como um estudo sobre como realizar as medições no campo de estudo.

Uma simulação computacional será realizada com base no ambiente de estudo. Para essa avaliação, inicialmente será modelado um ambiente 3D por meio do *software* SketchUP. Posteriormente, serão utilizados os *softwares* OpenStudio e EnergyPlus para determinar a carga térmica e realizar toda simulação dos componentes relacionados à climatização do ambiente.

A modelagem avaliará o ambiente em cinco cenários distintos: i) o primeiro cenário representa o sistema atual em operação do ambiente, onde não há nenhum controle para vazões de ar externo, tampouco recuperação de energia; ii) o segundo, representa o mesmo sistema, porém com o controle da vazão de ar exterior; iii) o terceiro, utiliza o recurso da recuperação de energia vinculado ao sistema atual; iv) o quarto, representa o cenário do sistema com as tecnologias de vazão de ar exterior variável, associada à recuperação de energia; v) o quinto cenário representa o sistema com controle de vazão de ar exterior associado ao recurso de free cooling.

Uma avaliação para monitoramento de todos os dispositivos, sensores e sistemas será realizado, para tal, o uso de sistemas de controle é necessário. É indispensável que todos os sistemas possuam uma boa comunicação entre si, para que a leitura e análise dos dados sejam possíveis.

Analisar a simulação computacional realizada sobre o estudo de caso em questão e comparar os resultados obtidos entre os cenários avaliados. Considerando os sistemas propostos, realizar uma análise de viabilidade para instalação dos cenários de melhor eficiência energética, assumindo os equipamentos e espaços disponíveis no local.

1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O capítulo 1 expõe uma visão geral sobre o problema proposto e sua importância, apresentando uma revisão bibliográfica sobre eficiência energética, vazão de ar exterior variável, sistemas de recuperação de energia, sistemas com operação free cooling e sua utilização em sistemas AVAC, bem como os objetivos e metodologia utilizada.

O capítulo 2 contém uma revisão de conceitos teóricos referentes aos requisitos de eficiência energética dispostos em normas internacionais e nacionais às certificações e programas de etiquetagem existentes.

O capítulo 3 apresenta uma revisão de conceitos teóricos referentes às tecnologias de recuperação de energia, assim como conceitos teóricos relativos à vazão de ar exterior variável e a qualidade do ar interior, dispendo sobre a evolução dos temas ao longo dos anos e apresentando uma análise das normas atuais vigentes na legislação brasileira, bem como uma abordagem acerca do free cooling em sistema de ar condicionado.

O capítulo 4 retrata o planejamento adotado no estudo de caso, juntamente com a simulação computacional que traz a metodologia de controle utilizada na simulação.

O capítulo 5 retrata o estudo de caso, as características e análises do ambiente e os parâmetros de operação que influenciam os resultados das simulações do sistema de climatização.

O capítulo 6 apresenta os resultados das simulações e as análises propostas nos diferentes cenários estudados, bem como uma análise dos parâmetros de operação que influenciam os resultados das simulações.

As conclusões finais e propostas para trabalhos futuros estão dispostas no último capítulo.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo a ABESCO (Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia), a eficiência energética consiste em usar de modo eficiente a energia para se obter um determinado resultado, é uma atividade que busca melhorar o uso das fontes de energia. Como as fontes de energia são finitas, este conceito deve ser pregado em praticamente todas as áreas de atuação, mantendo a relação de quantidade de energia empregada em uma atividade e a energia disponível da melhor forma. O incentivo à eficiência energética é um dos principais objetivos das políticas de energia, visto que contribui para a melhoria da gestão dos recursos, reduzindo assim os impactos ambientais e o consumo de energia.

Internacionalmente, durante os anos de 1970, afloraram os regulamentos de eficiência energética em edificações, também conhecidos por códigos de eficiência energética. Surgiram como uma ferramenta essencial na redução de desperdícios em edifícios. Estes têm como objetivo definir requisitos mínimos a serem atendidos em projetos de edificações, de forma que a utilização de recursos energéticos no edifício seja eficiente.

Nos Estados Unidos, um grupo de profissionais da área de AVAC é extremamente reconhecido mundialmente e teve início muito antes destes regulamentos. A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) foi fundada em 1894, é uma associação internacional que em 1975 implementou sua primeira norma acerca da eficiência energética para projetos e construções em novas edificações, a *ASHRAE Standard 90*.

Em 1989, a ASHRAE implantou a *Standard 90.1*, considerando a envoltória da edificação, sistemas de ar condicionado, iluminação artificial e aquecimento de água, incluindo, motores e equipamentos (Knijnik, 2011). O escopo desta nova regulamentação sobre eficiência energética em edificações demonstra uma maior preocupação acerca de tudo que envolve o ambiente em estudo e não apenas assuntos como o de conservação de energia, foco da regulamentação anterior (ASHRAE 90, 1975).

Os últimos estudos a respeito do desenvolvimento de padrões de eficiência energética nos Estados Unidos para edificações do setor comercial se basearam em programas de certificações, popularmente conhecidos por programas de edifícios verdes (*Green building programmes*) (VALVERDE, 2016). Desta forma, a ASHRAE desenvolveu a norma 189.1-2009, uma norma para edifícios verdes de alto desempenho, com o objetivo de fornecer requisitos mínimos para reduzir os impactos das edificações na saúde humana e no meio ambiente, através do uso eficiente de energia e de recursos naturais. Uma grande cooperação entre entidades de diversos países tem contribuído

significativamente para o desenvolvimento de regulamentos mais amplos e que englobem diversos cenários e conseqüentemente a aplicação destas medidas.

No Brasil antes dos anos de 1980, havia pouco interesse e incentivo à adoção de técnicas visando à redução do consumo de energia elétrica ou o aumento da eficiência na sua utilização. Devido à estrutura do setor elétrico brasileiro que tinha como característica, forte participação governamental e tarifas extremamente reduzidas em relação ao mercado internacional, estas práticas foram deixadas de lado em uma primeira abordagem. Entretanto, com o crescimento dos debates pelo mundo, principalmente pelos países desenvolvidos, fez-se necessário a criação de políticas públicas visando a racionalização do uso de energia e dos recursos naturais.

Atualmente, o Brasil conta com diversas instituições que tratam sobre o tema de eficiência energética, tais como a ELETROBRAS que é a responsável pela execução do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL); a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela execução do Programa de Eficiência Energética das Concessionárias; o Ministério de Minas e Energia (MME), responsável pela contabilidade relativa à oferta e ao consumo de energia elétrica no Brasil; a PETROBRAS, responsável pela execução do Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural (Conpet); o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), responsável pela execução do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE); e tantas outras empresas com programas internos de conservação de energia (VIANA *et al*, 2012).

Em 2001, após a crise do setor elétrico, o Brasil percebeu a importância do uso consciente de energia elétrica e passou a estimular ações visando à eficiência energética. A primeira medida foi a elaboração da Lei N° 10.295/2001, que estabeleceu a criação de mecanismos que resultassem em edificações energeticamente mais eficientes. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto N° 4.049, que obriga os fabricantes e importadores de equipamentos elétricos a respeitar níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética.

O Plano Nacional de Energia (PNE) definiu uma meta de economia de 10% no consumo final de energia elétrica que deve ser alcançada em 2030. Esta meta deve ser atingida principalmente devido ao aumento da eficiência dos sistemas energéticos. Com o intuito de direcionar e planejar o caminho para este objetivo, o Ministério de Minas e Energia está trabalhando no Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf).

2.2 PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é um programa de governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela ELETROBRAS. Foi instituído em 30 de dezembro de 1985 para promover a racionalização da produção e do consumo de

energia elétrica, com o intuito de reduzir os custos, bem como eliminar os desperdícios, mitigando, assim, os impactos ambientais.

No ano de 1993, o PROCEL elaborou o selo Procel de Economia de Energia, que tem como finalidade ser uma ferramenta capaz de caracterizar a eficiência dos equipamentos elétricos a disposição no mercado através de categorias. Todos os equipamentos candidatos ao selo devem ser submetidos a ensaios experimentais. O selo é concedido anualmente aos equipamentos elétricos que apresentam os melhores índices de eficiência energética em suas categorias.

Hoje em dia existem diversas áreas de atuação do Procel, são elas:

- Equipamentos;
- Edificações;
- Iluminação pública;
- Indústria e comércio.

Além destes segmentos da economia que impactam diretamente no consumo de energia elétrica no país, existem medidas sociais na elaboração e disseminação de informação qualificada em eficiência energética, seja por meio de ações educacionais no ensino formal ou da divulgação de dicas, livros, softwares e manuais técnicos.

Em 1984, o Inmetro viu a necessidade e a tendência internacional acerca da discussão sobre a criação de programas de avaliação da conformidade com foco no desempenho, com a finalidade de contribuir para a racionalização do uso da energia no Brasil através da prestação de informações sobre a eficiência energética dos equipamentos disponíveis no mercado nacional.

Inicialmente, esse pensamento foi voltado para o setor automotivo, devido às crises do petróleo que afetaram o mundo durante a década de 70. Posteriormente, esse projeto foi redirecionado e nomeado Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

Fazem parte do PBE programas de Avaliação da Conformidade que utilizam a Etiqueta Nacional de Conservação da Energia para prestar informações sobre o desempenho dos produtos no que diz respeito à sua eficiência energética. O PBE é composto por inúmeros programas de avaliação da conformidade em diferentes fases de implementação, que contemplam desde equipamentos como refrigeradores e condicionadores de ar até edificações.

A etiquetagem PBR edifica faz parte de uma parceria desenvolvida entre Inmetro e a Eletrobras/Procel Edifica. As etiquetas podem ser divididas em categorias, edificações comerciais, de serviços e públicas (Figura 2.1) e edificações residenciais, sendo estas de 3 tipos: unidades habitacionais autônomas (casas ou apartamentos), edificações multifamiliares e áreas de uso comum (Figura 2.2).



Figura 2.1 Exemplo de etiqueta para edificação comercial, de serviço e pública (Procel, 2006)

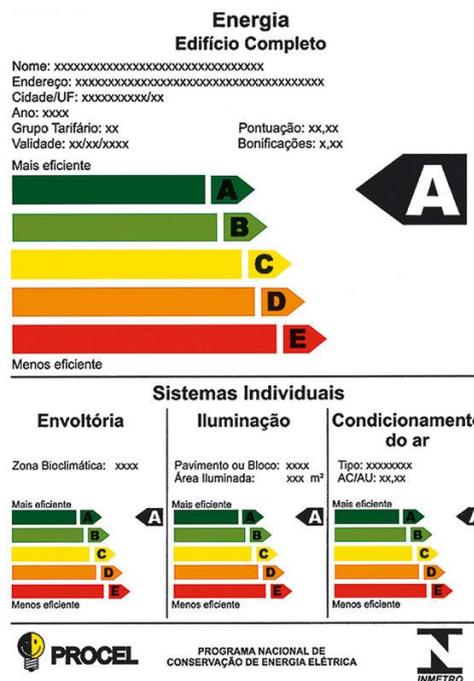


Figura 2.2 Exemplo de etiquetas de edificações residenciais (Procel, 2009)

2.3 PROGRAMAS DE CERTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS

2.3.1 LEED

Em 1998 foi posto em prática a certificação para construções sustentáveis *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), concebida e concedida pela organização não

governamental *U.S. Green Building Council* (USGBC). Este projeto tem como objetivo facilitar o intercâmbio de informações entre profissionais da indústria de construção, proporcionando reconhecimento junto ao mercado pelos esforços realizados acerca de construções ambientalmente conscientes.

Atualmente, existem inúmeros membros do *World Green Building Council*, entidade supranacional que regula a criação de conselhos nacionais, que tem como objetivo promover tecnologias e iniciativas sustentáveis em nível mundial. O selo LEED está presente em mais de 160 países e é considerado por muitas nações como principal certificação no que diz respeito à sustentabilidade em edificações. No Brasil, foi criado o *Green Building Council Brasil* (GBC Brasil), representante oficial do LEED que tem como propósito a adaptação dos critérios para realidades brasileiras.

O Brasil alcançou em 2012 a quarta colocação em países com o maior número de empreendimentos certificados, atrás apenas dos Estados Unidos, Emirados Árabes Unidos e a China. O LEED no Brasil é considerado a certificação sustentável mais reconhecida, desta forma, existem mais de 1000 empreendimentos registrados para a obtenção do certificado.

Esta certificação está disponível para todos os tipos de edifícios e pode ser aplicada a qualquer momento do empreendimento. Os projetos que solicitam a certificação LEED são analisados por 7 dimensões. Todas possuem práticas obrigatórias e recomendações que a medida que são atendidos garantem pontos ao empreendimento. O nível da certificação é definido, conforme a quantidade de pontos adquiridos, podendo variar de 40 pontos a 110 pontos. Os níveis são: Certificado, Silver, Gold e Platinum.

As pontuações do LEED são divididas nas seguintes dimensões:

- *Sustainable Sites* – Espaço Sustentável
- *Water Efficiency*– Eficiência do uso de água
- *Energy and Atmosphere*– Energia e a Atmosfera
- *Materials and Resources*– Materiais e Recursos
- *Indoor Environmental Quality*– Qualidade do ambiente interno
- *Innovation and Design Process*– Inovações no projeto da edificação
- *Regional Priority Credits*– Créditos de prioridade regional

Além destas dimensões, a certificação LEED depende ainda do tipo de empreendimento a ser analisado:

1. *New Construction and Major Renovation* (Novas construções e Grandes reformas)
2. *Existing Buildings – Operation and Maintenance* (Edifícios existentes – Operação e Manutenção)
3. *Commercial Interiors*(Interiores de edificações comerciais)

4. *Core and Shell* (Envoltória e Estrutura Principal)
5. *Retail* (Lojas de Varejo)
6. *Neighborhood Development* (Desenvolvimento de bairros)
7. *Schools* (Escolas)
8. *Healthcare* (Hospitais)

2.3.2 Procel Edificações

Segundo o Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, o Selo Procel Edificações, estabelecido em 2014, é um instrumento de adesão voluntária que tem por objetivo principal identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética em uma dada categoria, motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar imóveis mais eficientes.

Para obter o Selo Procel Edificações, recomenda-se que a edificação seja concebida de forma eficiente desde a etapa de projeto, ocasião em que é possível obter melhores resultados com menores investimentos, visto que a adaptação de estruturas já existentes é extremamente complexa devido a restrições de projeto. O Selo Procel Edificações é outorgado tanto na etapa de projeto, válido até a finalização da obra, quanto na etapa da edificação construída. Os modelos e as formas de aplicação do Selo estão descritas no Manual de Identidade Visual do Selo Procel Edificações.

A metodologia de avaliação da conformidade está descrita no Regulamento para Concessão do Selo Procel de Economia de Energia para Edificações, bem como nos Critérios Técnicos específicos e baseiam-se no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edificações Residenciais (RTQ-R) do Programa Brasileiro de Edificações – PBE Edifica.

Nos edifícios comerciais, de serviços e públicos são avaliados três sistemas: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Nas Unidades Habitacionais são avaliados: a envoltória e o sistema de aquecimento de água. Os Selos são emitidos pela Eletrobrás após a avaliação realizada por um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA) pelo Inmetro, com escopo de Eficiência Energética em Edificações.

O Selo Procel Edificações pode ser utilizado como caminho alternativo para a comprovação do atendimento ao pré-requisito de desempenho energético mínimo no processo de obtenção da certificação internacional de construções sustentáveis LEED. O critério de equivalência é válido para edificações comerciais, públicas e de serviços localizadas em todo o território nacional, exceto as destinadas à assistência médica, data centers, instalações industriais, armazéns e laboratórios.

3 CLIMATIZAÇÃO E QUALIDADE DO AR

3.1 QUALIDADE DO AR INTERIOR

3.1.1 Visão geral

Sistemas de ar condicionado e ventilação são projetados para proporcionar ambientes com temperatura e umidade adequadas, conforto térmico, livre de concentrações perigosas de poluentes do ar, sendo que o processo mais complexo envolvido na ventilação é o mais importante na determinação de uma boa qualidade do ar interno. A ventilação é uma combinação de processos que resultam não só no fornecimento de ar externo, mas também na retirada do ar de circulação de dentro de um edifício. Esses processos envolvem a entrada de ar externo, o condicionamento da mistura de ar externo com o ar de circulação, a difusão deste ar por todos os ambientes climatizados do edifício e a exaustão de alguma parcela do ar interno.

A qualidade do ar interno pode ficar prejudicada quando uma ou mais etapas desse processo forem inadequadas. Como grande problema em edifícios com elevado perfil de ocupação, a presença do dióxido de carbono pode aumentar indevidamente, caso não sejam tomadas medidas para controlar sua concentração dentro do ambiente. O CO₂ é apenas um de muitos poluentes gasosos que, em elevadas concentrações, pode provocar efeitos adversos à saúde, como dor de cabeça, mal estar, tontura, problemas de pele e em casos extremos levar a óbito, conforme EPA (1991).

A baixa qualidade do ar interior é considerada um dos principais problemas em sistemas de climatização. Este defeito recebeu maior atenção por volta de 1970, quando números significativos dos ocupantes de edifícios, em torno de 20% segundo Robertson (1995), relatavam doenças relacionadas ao ambiente de trabalho. Esse fenômeno ficou conhecido como a síndrome do edifício doente, "*Sick Building Syndrome*". Estudos realizados na década de 70 e 80 investigaram e concluíram que a ausência de ar externo, a falta de manutenção nos sistemas de ar condicionado e o uso impróprio de componentes do mesmo eram responsáveis por mais da metade dos incidentes da síndrome do edifício doente.

Possuir um edifício saudável significa, ao menos, ter uma boa qualidade do ar interior, mediante o uso de adequadas taxas de ventilação, de sistemas de automação predial e de um monitoramento contínuo das instalações. Atualmente, há uma estimativa de que grande parte das pessoas, principalmente em ambientes urbanos, passa entre 80 e 90% do seu tempo dentro de edifícios (Prado et al., 1999). Dessa maneira, isto significa que, na maior parte do tempo, estamos sujeitos a um ambiente artificial que é modificado pelo espaço fechado do edifício. O que é preocupante é a forma com que esse ambiente é modificado, já que o problema da qualidade do ar é real e crescente. Segundo Raw (1997), sua natureza é difícil de avaliar, pois muitos componentes químicos diferentes estão envolvidos e alguns deles não são perceptíveis como, por exemplo, o radônio.

3.1.2 Fatores que afetam a QAI

Diversos fatores afetam a qualidade do ar interior. Para cada fator existem os tipos de poluentes, as fontes mais conhecidas e seus efeitos à saúde, bem como também planos específicos para a prevenção e resolução de problemas relativos a cada fator. Podem ser considerados os seguintes fatores: i) ventilação de ar externo; ii) contaminantes químicos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxido e dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, amônia, formaldeído; iii) compostos voláteis: acetona, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos; iv) contaminantes biológicos: ácaros, fungos, bactérias e vírus; v) material particulado; vi) ocupantes do edifício, vii) outros contaminantes: asbesto e radônio (Prado et al., 1999).

3.2 VAZÃO DE AR EXTERIOR

Grande parte da população passa a maior parte da sua vida alocada em edifícios com sistemas mecânicos de aquecimento, ventilação e ar condicionado. O controle dos poluentes é a maneira mais efetiva de manter o ar interno limpo. Entretanto, o controle de todas as fontes, ou pelo menos a mitigação de suas emissões, nem sempre é possível. A ventilação, natural ou mecânica, é a segunda maneira mais efetiva de proporcionar condições aceitáveis de ar interno. O Instituto Nacional de Segurança Ocupacional e Saúde relata que uma ventilação pobre e inadequada é um fator que contribui de maneira importante em muitos casos de edifícios doentes.

Estudos e pesquisas realizados por Gabel et al e Roth et al em torno do tema ventilação foram realizados com o intuito de identificar a necessidade humana por um ar de qualidade. Instituições e associações tanto internacionais quanto nacionais buscaram informar qual seria a taxa de ar necessária para diluir os poluentes, remover odores, bem como proporcionar um ar que não fosse prejudicial à saúde humana.

Atualmente, as taxas nas quais o ar externo é introduzido no ambiente interno são especificadas por normas nacionais e internacionais. Essas taxas são baseadas principalmente na necessidade de controle dos odores e dos níveis de CO₂. No começo do século, as normas de ventilação para edificações, conforme descreve EPA, requeriam aproximadamente 25 m³/h de ar externo por ocupante. Posteriormente, devido à crise do petróleo, foi imposta uma medida de economia de energia e com isso houve uma redução significativa na taxa de ar de renovação para aproximadamente 8 m³/h por ocupante, segundo ASHRAE (1989).

Essas normas estão em constante atualização conforme estudos na área são desenvolvidos. Foi verificado que a redução nas taxas de fornecimento do ar estava causando condições inadequadas para manter a saúde dos ocupantes, bem como seu conforto. A ASHRAE revisou os padrões de ventilação e concluiu que era possível, com a tecnologia da época, fornecer uma taxa de 25 m³/h por usuário, sem gastos adicionais de energia.

Ao longo dos anos essas normas foram sendo atualizadas, e as tendências atuais levam para uma relação da qualidade do ar interior com a economia de energia, prevendo a utilização de sistemas que controlem as vazões necessárias de acordo com a demanda, chamados de sistemas DCV (*demand controlled ventilation*) (ASHRAE 62.1-2010 e 189.1-2009). No Brasil, a Portaria 3.523 do Ministério da Saúde publicada em 1998 regula sobre a qualidade do ar interior, definindo rotinas de manutenção necessárias, vazões de ar externo, e etc. Após ela, a norma ABNT NBR 16401-3 de 2008 é a mais recente sobre o tema, e traz inovações baseadas na norma americana mais atual que versa sobre os requisitos de ventilação para manutenção da qualidade do ar interior (ASHRAE 62.1-2010).

3.2.1 ABNT NBR 16401-3/2008(Parte 3: Qualidade do ar interior)

Essa norma brasileira foi desenvolvida em um conjunto de 3 partes para regular sistemas de ar condicionado. Essa parte restringe os parâmetros básicos e requisitos mínimos para sistemas de ar condicionado, visando à obtenção de qualidade aceitável de ar interior para conforto. Isto é possível a partir das definições de vazões mínimas de ar exterior para ventilação, níveis mínimos de filtragem do ar e requisitos técnicos dos sistemas e componentes relativos à qualidade do ar. A norma se aplica a sistemas centrais de qualquer capacidade e a sistemas unitários com mais de 34.000 BTU/h (10kW).

A vazão de ar exterior requerida é determinada como estipulado na norma internacional, adotando a metodologia da ANSI/ASHRAE 62.1. O conceito de vazão eficaz é constituído pela soma de duas partes, avaliadas separadamente: a vazão relacionada às pessoas e a vazão relacionada à área ocupada:

$$V_{ef} = F_p * P_z + F_a * A_z, \quad (3.1)$$

V_{ef} = Vazão eficaz de ar exterior [L/s];

F_p = Vazão volumétrica de ar externo por ocupante [L/s*peessoa];

P_z = Número máximo de pessoas na zona de ventilação;

F_a = Vazão por área útil ocupada [L/s*m²];

A_z = Área útil ocupada pelas pessoas do ambiente [m²].

Os valores de vazão eficaz mínima são levantados com o auxílio de uma tabela, para diversos locais de aplicação. Essa tabela dispõe de valores para F_p e F_a para 3 cenários de climatização, cujo nível 3 é o nível mais conservador, ou seja, utiliza um maior valor de vazão eficaz mínima e o nível 1 representa o valor mínimo aceitável de vazão de ar exterior para ventilação.

A vazão a ser suprida na zona da ventilação é a vazão eficaz corrigida pela eficiência da distribuição de ar na zona:

$$V_z = \frac{V_{ef}}{E_z}, \quad (3.2)$$

V_z = Vazão de ar externo a ser suprida na zona de ventilação [L/s];

E_z = Eficiência de distribuição de ar na zona.

A vazão de ar exterior a ser suprida pelo sistema, considerando um sistema com zona de ventilação única:

$$V_s = V_z, \quad (3.3)$$

V_s = Vazão de ar externo na tomada de ar [L/s].

O Anexo C da norma brasileira também apresenta, baseado na norma ASHRAE 62.1, um informativo em relação ao CO₂ como indicador de qualidade do ar, sendo considerado um indicador válido do nível de poluição produzido pelas pessoas. Não sendo, porém, um indicador da qualidade do ar do recinto, pois inúmeros poluentes químicos presentes, além dos produzidos pelas pessoas, não têm nenhuma relação com a concentração de CO₂. Uma equação simples determina a vazão de ar exterior necessária para manter a concentração volumétrica de CO₂ no recinto abaixo de determinado nível:

$$V_0 = N / (C_s - C_0), \quad (3.4)$$

V_0 = Vazão de ar externo por pessoa [m³/h/pessoa];

N = Taxa de geração de CO₂ por pessoa [ppm/hora/pessoa];

C_s = Concentração de CO₂ no recinto [ppm];

C_0 = Concentração de CO₂ no ar exterior [ppm].

A concentração máxima de CO₂ de 1000 ppm no recinto é frequentemente citada como critério de qualidade de ar aceitável do ar interior. Porém, esse critério pressupõe as seguintes condições essenciais, que pode levar a interpretações distorcidas: a concentração no ar exterior é assumida arbitrariamente em 300 ppm (quando normalmente este valor oscila entre 400 e 600 ppm). Uma medição acima de 1000 ppm não indica que o critério não é satisfeito, desde que a medição não ultrapasse em mais de 700 ppm a concentração de ar exterior.

3.3 SISTEMAS E EQUIPAMENTOS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

3.3.1 Visão geral

Devido ao crescimento da conscientização com relação à eficiência energética, e com os avanços tecnológicos no âmbito energético, sistemas com a proposta de recuperação de energia estão cada vez mais presentes em projetos. A energia pode ser recuperada tanto na sua forma sensível quanto na sua forma latente, com isso sistemas e equipamentos de recuperação energética estão se difundindo em grande parte de sistemas de ar condicionado.

A recuperação de energia utilizada em sistemas de climatização de edifícios tem como objetivo diminuir o consumo de energia relacionado ao condicionamento do ar exterior. Existem diversos tipos de recuperador de energia, entretanto o funcionamento básico ocorre da seguinte maneira: ocorre uma transferência de energia entre o ar de exaustão do edifício e o ar externo que será tratado termicamente para climatizar o ambiente.

Os sistemas de recuperação de energia podem ser divididos em categorias de acordo com suas aplicações: processo para conforto, processo para processo e conforto para conforto.

Em casos de processo para conforto, o calor desperdiçado é recuperado dos processos de exaustão para aquecer as edificações durante o inverno. Nestas aplicações como o calor é recuperado apenas em condições climáticas específicas, a economia anual não é tão expressiva quanto em outras aplicações. Os equipamentos dessas aplicações geralmente recuperam apenas calor sensível e não transferem umidade entre as correntes de ar.

Nas aplicações processo para processo, o calor é capturado da corrente de exaustão do processo e transferido para a corrente de entrada. Os dispositivos que realizam essa recuperação transferem apenas calor sensível, uma vez que a transferência de umidade é normalmente prejudicial ao processo. Nesses casos, uma vez que o calor pode ser recuperado ao longo de todo o ano, a economia proporcionada de aplicações de processo para processo em relação as aplicações de processo para conforto, economizam mais energia anualmente.

Em aplicações conforto para conforto, o equipamento recuperador de energia diminui a entalpia do ar de entrada no edifício durante o verão e aumenta a entalpia durante o inverno, a partir da transferência de energia entre a corrente de ventilação de ar externo e a corrente do ar de exaustão do ambiente interno. Esses dispositivos podem ser recuperadores de calor sensível apenas ou de calor sensível e umidade.

Quando a umidade do ar externo é baixa e o espaço condicionado tem uma apreciável carga latente, um dispositivo de ERV pode recuperar calor sensível enquanto aumenta suavemente a carga latente do espaço condicionado, uma vez que o vapor de água é transferido dentro do ERV para o ar externo que entra na edificação. Assim, é importante determinar quando a dada aplicação requer um dispositivo de HRV ou um de ERV.

HRV é desejável quando a umidade do ar externo é baixa e a carga latente do edifício é alta durante a maior parte do ano, e, ainda em aplicações em piscinas, exaustões químicas, cabines de pinturas e resfriadores evaporativos indiretos. ERVs são desejáveis para aplicações em escolas, escritórios, residências e outras aplicações que requeiram um pré-aquecimento ou um pré-resfriamento econômico da ventilação de ar externo (VALVERDE, 2016).

3.3.2 Heat recovery ventilators - HRVs

O dispositivo de HRV (Figura 3.1) permite apenas a transferência de energia em forma de calor sensível, associada a uma diferença de temperatura entre correntes de ar ou entre uma corrente de ar e uma superfície sólida.

A operação destes dispositivos consiste na troca de calor, cuja fonte é extraída, de correntes de ar de exaustão de diversas aplicações como fogões, fornos, câmaras de combustão para pré-aquecer o ar de entrada. Ou de maneira contrária, sua operação pode ser voltada para o resfriamento do ar de entrada com a utilização da troca de calor entre as correntes de ar externo e de exaustão.

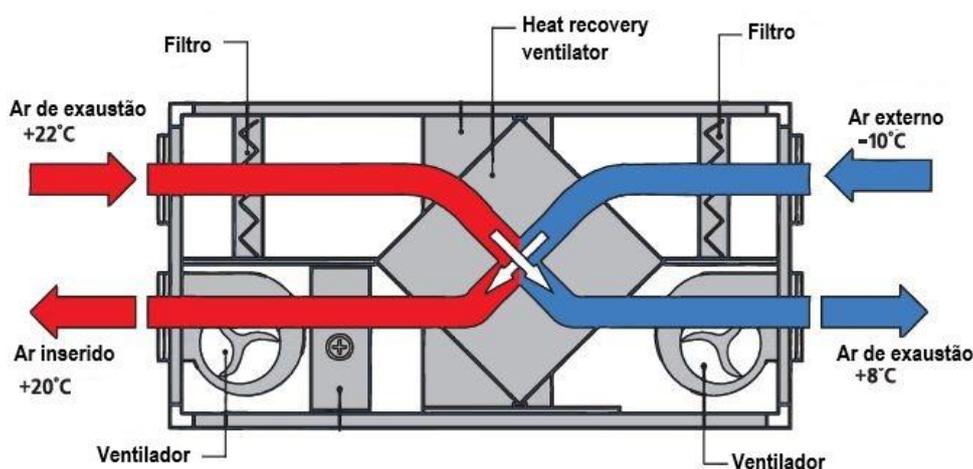


Figura 3.1 Modelo esquemático dispositivo HRV (BARRIE, 2016)

Os dispositivos HRV são compostos por:

- Núcleo para troca de calor com elemento filtrante;
- Mecanismos de pré-aquecimento e prevenção de congelamento de partes internas do dispositivo;
- Drenos removedores de líquido;
- Controle de temperatura e de velocidade;
- Ventiladores para ar de entrada e ar de exaustão;
- Dutos de admissão e de exaustão;

Esses equipamentos podem ser utilizados em praticamente todas as situações, especialmente em aplicações como piscinas e câmaras de pintura. O HRV além de proporcionar uma economia de energia devido à troca de calor entre as correntes de ar, graças aos elementos filtrantes, garante a remoção de diversos poluentes no ar de admissão do sistema de climatização.

3.3.3 Energy recovery ventilators - ERVs

Os dispositivos ERV (Figura 3.2) são conhecidos como dispositivos de energia, dispositivos entálpicos ou ventiladores recuperadores de energia, pois são capazes de transferir tanto calor como umidade. Estes aparelhos normalmente são recomendados em lugares de condição climática mais quente, onde é desejável a retirada de umidade do ar exterior.

ERVs podem ser usados onde existe a oportunidade para transferir calor e massa (vapor de água), em áreas úmidas, escolas, escritórios com grande ocupação, etc. A transferência de calor latente pode ocorrer em ambas as direções dependendo da diferença de umidade entre os ambientes em questão.

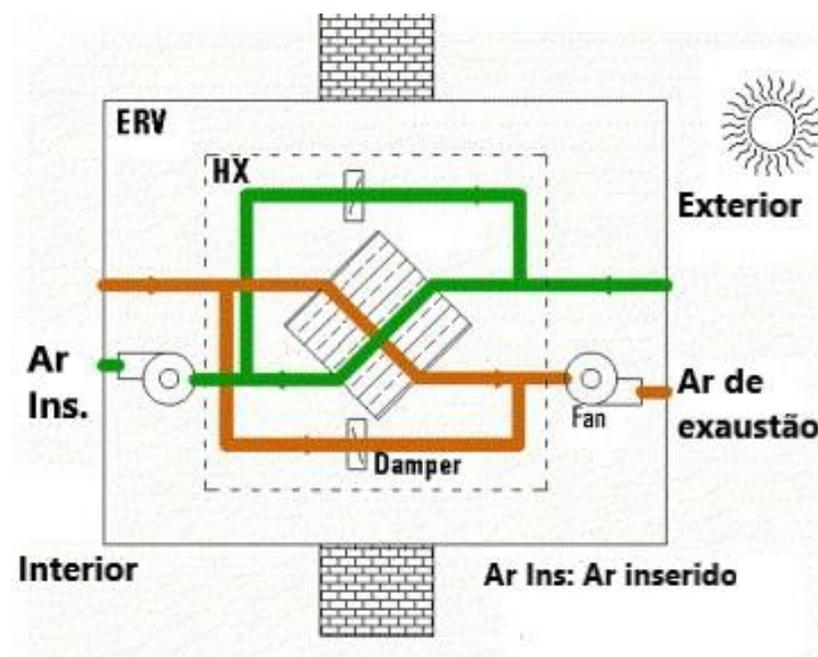


Figura 3.2 Modelo esquemático dispositivo ERV (ZHOU et al, 2007)

Os dispositivos de recuperação de energia ERV são compostos por:

- Núcleo de troca de calor;
- Mecanismos de pré-aquecimento e prevenção de congelamento de partes internas do dispositivo;
- Ventiladores para ar de entrada e ar de exaustão;
- Elementos para filtragem;

- Dutos de admissão e de exaustão;

Atualmente existem alguns tipos de ERVs disponíveis, são eles os trocadores de calor de placas (*fixed plates*), rodas giratórias (*Rotary wheels*), tubos de calor (*heat pipes*), trocadores de calor por meio de bombeamento de fluido em serpentina (*runaround loops*), termossifões (*thermosiphons*) e recuperadores de entalpia tipo torre gêmeas (*twin-tower enthalpy recovery loops*). O desempenho desses equipamentos é geralmente caracterizado pela eficiência, pela perda de carga, pelo bombeamento ou potência de ventilação, pelo fluxo cruzado (vazamento de ar de uma corrente para a outra) (VALVERDE, 2016).

3.4 FREE COOLING

O free cooling é uma abordagem para reduzir o consumo de energia elétrica nos dispositivos de climatização ativa de um edifício, buscando a utilização de soluções passivas quando possível. Esse processo pode funcionar em conjunto à refrigeração mecânica, reduzindo o consumo energético no equipamento, ou em condições favoráveis ser capaz de compensar toda a demanda energética do ambiente.

O ar predominante em cidades de determinadas latitudes e elevações pode ser consideravelmente mais frio durante certas estações do ano e horários do que o ar que é aquecido pelo equipamento do edifício ou data center. Ao introduzir o ar externo mais frio diretamente ou utiliza-lo indiretamente para resfriar a água da serpentina de resfriamento no local, é possível reduzir ou eliminar o uso de sistemas AVAC. Os sistemas de resfriamento que usam essa abordagem às vezes são chamados de air-side economizers.

Além da utilização do ar externo em condições favoráveis, soluções alternativas são fontes de água naturalmente frias de rios, lagos ou fontes oceânicas locais que podem ser circuladas ao invés de utilizar o sistema convencional de refrigerar um circuito fechado de água com um resfriador. Os sistemas que usam essa abordagem costumam ser chamados de water-side economizers, que podem ser usados para resfriar o ar ambiente, refrigerar diretamente os gabinetes em data centers e outros sistemas.

Com tantos avanços nas tecnologias de eficiência de resfriamento, o conceito de free cooling é real e eficiente, podendo ser aplicado a diversos ambientes. Considerando os diferentes métodos de free cooling, operadores de diferentes aplicações de climatização em edifícios ou data centers possuem a oportunidade de escolher a melhor solução dada as especificações do sistema, podendo inclusive adotar uma combinação com economizadores a ar e a água. Algumas aplicações aproveitam a utilização da torre de resfriamento para resfriar a água do condensador a uma temperatura baixa o suficiente quando as condições do ar externo permitem, para pré-resfriar o circuito da zona térmica sem usar os dispositivos de climatização ativa.

Em todos os casos, os sistemas de resfriamento mecânico seriam necessários apenas quando as temperaturas do ar externo se tornassem muito altas para que os sistemas de free cooling, como os air-side ou water-side economizers, fossem eficazes. Conseqüentemente, a vida útil dos sistemas de resfriamento instalados pode ser significativamente estendida. Reduções no uso do sistema de resfriamento também significam reduções drásticas no consumo de energia, diminuindo os custos de energia e manutenção para os proprietários das instalações. Se as condições existentes permitirem o uso contínuo de air-side ou water-side economizers, os sistemas de refrigeração do ambiente climatizado podem ser totalmente eliminados.

O conceito free cooling está em constante difusão no âmbito de eficiência energética, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas principalmente em aplicações de data centers devido à essência do sistema. O perfil de temperatura ao longo de um dia é bastante similar em qualquer lugar, onde durante o dia a temperatura é mais elevada, com pico máximo aproximadamente às 14h e durante a noite temperaturas mais baixas, com mínimo aproximadamente às 5h. Portanto, aplicações onde o sistema refrigeração mecânica é demandado em momentos os quais a temperatura externa é baixa, como edifícios de funcionamento noturno e data centers, são ótimos para utilização de free cooling.

Ao contrário do que o nome free cooling indica, este tipo de técnica não é completamente livre de custo, pois são necessários equipamentos para seu funcionamento, como bombas, ventiladores e unidades para tratamento do ar ou da água, estes dispositivos também requerem reparos periódicos e manutenção.

A Figura 3.3 representa um desenho esquemático de um sistema de climatização com solução free cooling.

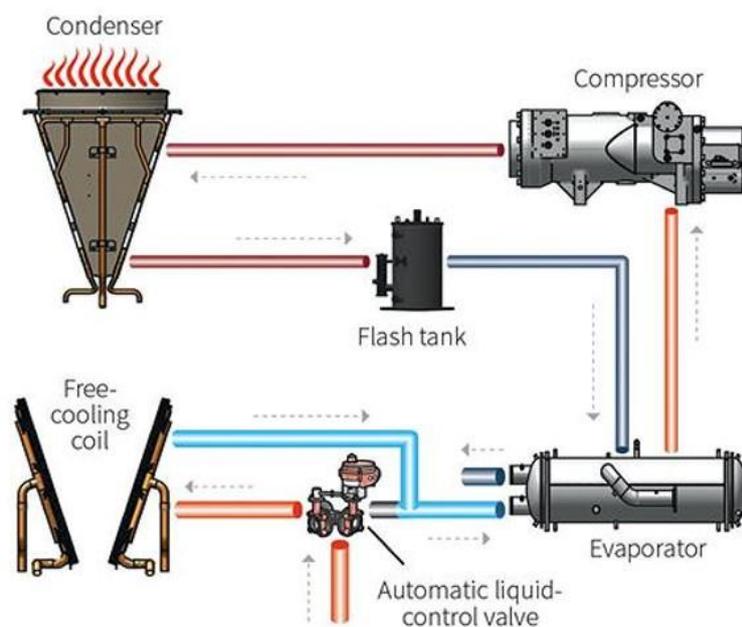


Figura 3.3 Modelo esquemático circuito free cooling (KOPKO e RUDIO, 2017)

Como se pode observar o sistema mostrado permite a utilização direta da água fria produzida numa serpentina de free cooling que de acordo com as propriedades externas do local inserido é capaz de diminuir a carga térmica a ser retirada pelo evaporador do sistema. Esta associação é capaz de diminuir o consumo elétrico no compressor do dispositivo, visto que a energia requisitada deste componente será reduzida.

No presente trabalho será implementado na simulação o sistema de free cooling da seguinte forma, caso as propriedades do ar externo estejam em condições inferiores de temperatura em relação à condição de conforto do ambiente, o mesmo será inserido de forma máxima. Paralelamente a esse sistema, será utilizado um ciclo de água proveniente da torre de resfriamento, que em determinadas épocas do ano pode apresentar condições de temperaturas consideravelmente baixas, possibilitando assim, sua utilização para um pré-resfriamento do ar. Essa abordagem será explicada mais detalhadamente nos capítulos seguintes.

4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

4.1 DESCRIÇÃO

A simulação computacional realizada para avaliação do sistema de climatização foi dividida em duas partes. Primeiramente, foi modelado o ambiente 3D com o auxílio do *software* SketchUP, posteriormente foi realizada uma análise acerca de todos os parâmetros que caracterizam esse ambiente. Nesta segunda etapa, todas as informações com relação à cidade de projeto, estrutura física, envoltória, perfil ocupacional e cargas internas foram consideradas para a obtenção dos resultados de carga térmica por meio dos *softwares* OpenStudio (interface de utilização) e EnergyPlus.

A configuração do sistema de climatização em estudo é composta por diferentes ciclos. Cada um deles desempenha papel de extrema importância para o funcionamento do conjunto como um todo. Existe primeiramente o ciclo de ar que condiciona o ambiente, o circuito de água gelada fornecida pelo chiller que passa pela serpentina de resfriamento e o circuito de condensação a água onde o chiller rejeita o calor retirado do ambiente que posteriormente é lançado ao ambiente externo através da torre de resfriamento como pode ser identificada na Figura 4.1.

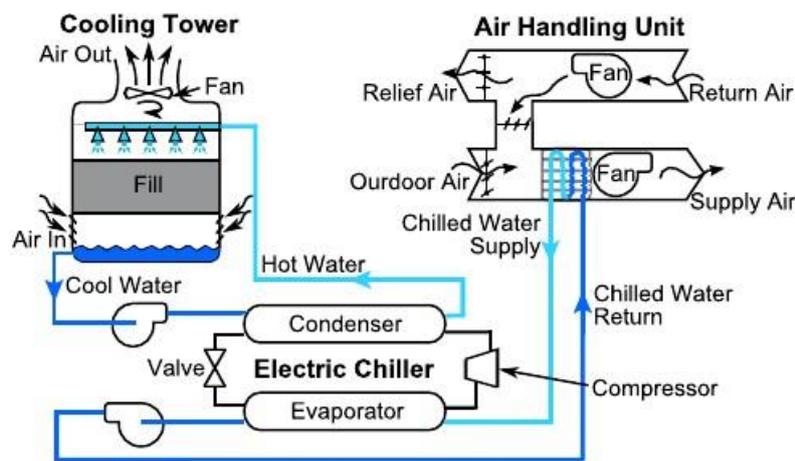


Figura 4.1 Representação esquemática de sistema de chiller a água (XIAO LI et al, 2012)

O principal equipamento neste tipo de sistema de climatização é o chiller, ele é responsável pelo ciclo de refrigeração por compressão. Existem diversos tipos de chiller, com diferentes coeficientes de performance, diferentes faixas de operação, bem como de diversas potências. Este equipamento rege o funcionamento do sistema de climatização, visto que ele é responsável pelo ciclo de compressão a vapor. As informações com relação a este dispositivo estão dispostas no Apêndice B.2.

O sistema adotado para que seja possível analisar os efeitos anuais das técnicas de recuperação de energia, de vazão de ar exterior variável e de free cooling em um sistema de climatização constitui-

se basicamente de 04 (quatro) subsistemas, conforme ilustrado na Figura 4.2: subsistema do ambiente condicionado; subsistema do equipamento de ar condicionado; subsistema do controle de vazão de ar exterior; dispositivo recuperador de energia.

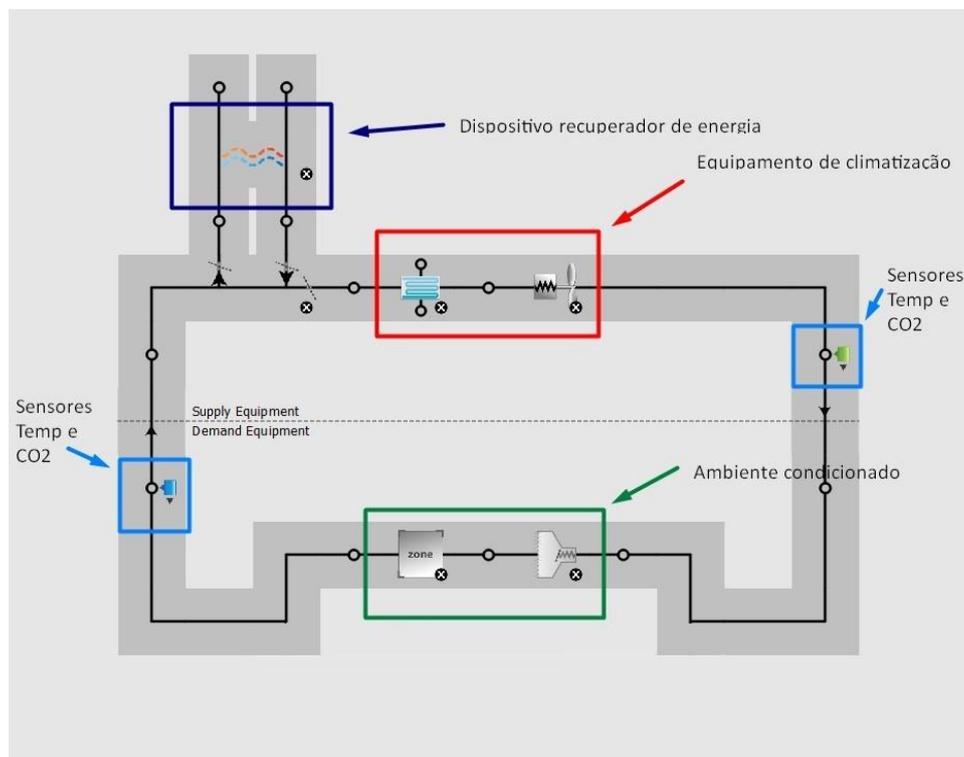


Figura 4.2 Modelo esquemático de simulação do sistema de climatização com subsistemas indicados (OpenStudio)

O funcionamento do esquema adotado pode ser descrito da seguinte forma:

1. O subsistema do ambiente condicionado representa o local destinado à ocupação, principal motivo da utilização de um sistema de climatização. Esse espaço é definido a partir de um perfil de carga térmica proveniente da ocupação, iluminação e equipamentos responsáveis por uma geração interna.
2. O subsistema do equipamento de ar condicionado representa a solução à demanda do ambiente condicionado. É definido a partir da carga térmica do caso em estudo e das curvas de desempenho energético do sistema em diferentes condições de operação.
3. O subsistema do controle de vazão de ar exterior é responsável pelo controle da quantidade de ar externo de renovação que será necessário devido à ocupação do ambiente. Esse controle será realizado através de medições da concentração de dióxido de carbono no ar exterior e no ar interno do ambiente, com o intuito de garantir uma boa qualidade do ar interior, segundo normatizações.
4. O subsistema do dispositivo recuperador de energia é acoplado aos dutos do ar exterior e do ar de exaustão. Será responsável pela redução da carga térmica do ar de

renovação, quando possível, proporcionando uma transferência de calor entre as correntes de ar e conseqüentemente reduzindo o consumo energético do subsistema de ar condicionado.

Para uma boa operação do sistema de climatização é necessário que todos os subsistemas estejam funcionando corretamente, pois eles representam uma rede interligada extremamente dependente. Portanto, para que os resultados das simulações apresentem valores confiáveis é necessário realizar uma caracterização de cada um dos subsistemas.

4.2 AMBIENTE CONDICIONADO

O ambiente em estudo é representado por uma zona térmica única, com regimes de utilização e de carga térmica pré-definidos. Essa zona térmica é mantida por um único equipamento de ar condicionado e com controle central para todo o ambiente. Foi considerada a zona de ventilação equivalente à zona de controle térmico e de QAI, para efeito do dimensionamento das vazões de ar externo. O ambiente estudado atende a norma ABNT NBR 16401-3/2008 que exige sistemas de controle de vazão de ar exterior em sistemas centrais de qualquer capacidade e de sistemas unitários com mais de 34.000 BTU/h (10kW).

O espaço será definido a partir de um perfil de carga térmica gerado para todas as horas do ano (8760), que leva em consideração a envoltória, o clima da cidade em questão, sombreamento, perfil de ocupação, infiltração, iluminação, equipamentos e a carga térmica devido ao ar de renovação.

Para o cálculo das cargas térmicas foram utilizados os *softwares* OpenStudio e EnergyPlus que atendem as normas da ASHRAE em relação à metodologia de cálculo.

4.3 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

O sistema de climatização básico é composto por 3 partes distintas que juntas são capazes de fornecer o resfriamento necessário para o ambiente condicionado. O equipamento responsável por realizar o ciclo de compressão a vapor é o *chiller*, este equipamento é um resfriador de líquido que opera em expansão direta. Conectados ao sistema central de expansão direta (*chiller*) há um ciclo de condensação à água para rejeitar o calor absorvido do ambiente e um ciclo de água gelada para fornecimento dos climatizadores do tipo *fan coil*.

O funcionamento completo do sistema consiste na produção de água gelada para climatização do ambiente e posteriormente da rejeição do calor absorvido da zona térmica através de outro ciclo de água (condensação).

A Figura 4.3 representa o ciclo de ar condicionado com água gelada do tipo *fan coil*.

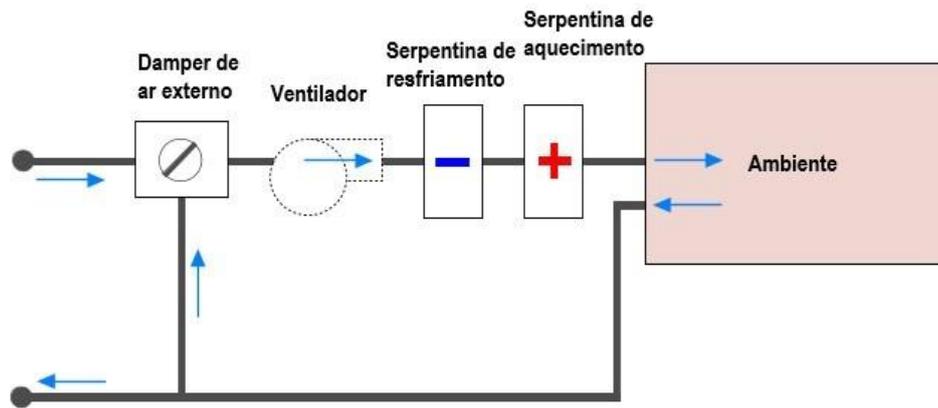


Figura 4.3 Modelo esquemático *fan coil* AVAC (DesignBuilder, 2017)

Ao considerar a utilização do conceito de free coling, são adicionadas mais duas partes a esse sistema de climatização. Um circuito que conecta o ciclo de condensação a um ciclo de resfriamento é inserido, de forma que em condições favoráveis de temperatura, a água do ciclo de condensação, da torre de resfriamento, poderá ser utilizada como forma de ciclo de água gelada e desta forma auxiliar no resfriamento do ambiente. Paralelamente é implementado um sistema que aumenta a vazão do ar externo para o máximo em casos onde a temperatura do ambiente exterior é inferior a temperatura do ambiente interno, operando assim com ambos os tipos de water-side economizer e air-side economizer.

O funcionamento desta configuração permite que a água gelada produzida pelo *chiller* ocorra em menor quantidade em determinadas situações, proporcionando assim economia de energia elétrica do dispositivo de expansão direta.

A Figura 4.4 representa o ciclo de água para o free cooling.

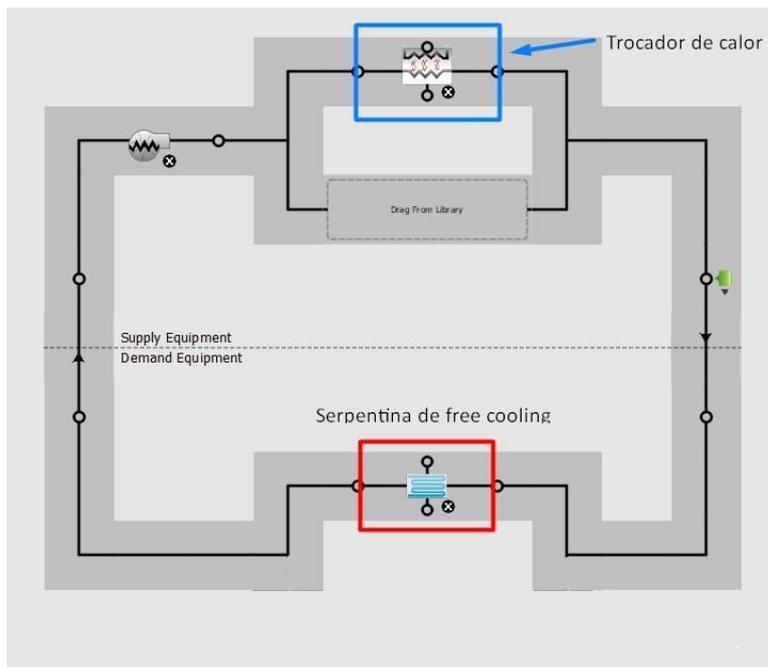


Figura 4.4 Modelo esquemático ciclo free cooling (OpenStudio)

4.4 DISPOSITIVO CONTROLE DE VAZÃO DE AR EXTERIOR

O subsistema de controle de vazão de ar exterior por CO₂ é composto por sensores de CO₂, controlador, inversores de frequência capazes de variar a velocidade do ventilador e dispositivos de regulação motorizados (dampers). O sistema funciona basicamente por meio da medição da concentração de CO₂ no ambiente interno. O controlador faz a comparação do nível medido no ambiente interno com o nível de concentração pré-estabelecido por um setpoint, atuando assim no damper de ar externo e de retorno.

As estratégias de controle adotadas são de controle proporcional ou limitante, uma vez que ela produz uma vazão de ar exterior que equivale ou excede os requisitos da norma (ABNT NBR 16401-3/2008). Quando a vazão de ar externo é compatível com a ocupação instantânea do ambiente de acordo com a ventilação externa de projeto. Ou quando a concentração atual de CO₂ do ambiente interno atinge o valor limite estipulado, neste caso a vazão de ar externo deve ser capaz de impedir o aumento da concentração de CO₂.

A Figura 4.5 ilustra o modelo adotado.

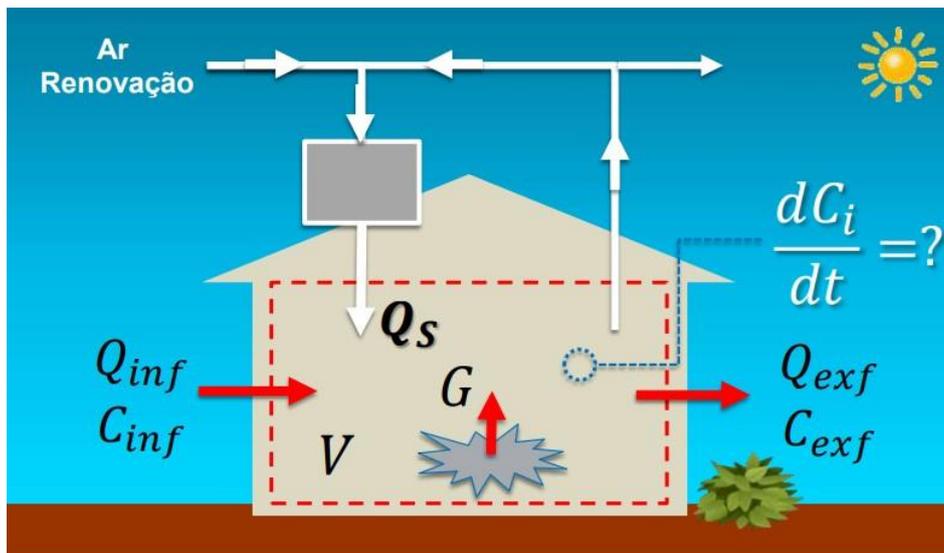


Figura 4.5 Modelo de ventilação diluidora (PIMENTA, 2016)

A formulação matemática utilizada para prever a vazão de ar externo nas simulações baseia-se nos requisitos da norma técnica (ABNT NBR 16401-3/2008), especificada no Capítulo 3. Como a programação de ocupação do ambiente é definida previamente, é possível estabelecer a vazão de ar externo necessária para cada hora de operação, uma vez que a vazão de ar externo requerida pelas normas é composta pela soma de uma parcela proporcional ao número de ocupantes e uma parcela referente a área de ocupação (valor fixo). Posteriormente, é feita uma comparação da vazão de ar externo a partir dos valores fornecidos pela norma com valores para manutenção da concentração de CO₂.

4.5 DISPOSITIVO RECUPERADOR DE ENERGIA

O dispositivo recuperador de energia é composto pelo equipamento de ERV interligado ou não ao subsistema de controle de vazão de ar exterior, por sensores de temperatura e umidade para a medição das condições do ar externo, além de um controlador. Este é responsável por regular a operação do equipamento a partir das condições momentâneas, permitindo o funcionamento apenas em períodos que exista uma redução efetiva da carga térmica do ar de renovação.

Para a simulação computacional com a utilização do ERV é necessário que as eficiências latente, sensível e total do dispositivo sejam bem definidas, bem como os fenômenos que modificam essas eficiências, como as variações de vazão de ar que atravessam o equipamento e as variações de temperatura e umidade do ar externo.

Dessa forma, para uma melhor disposição dos parâmetros e valores utilizados na simulação, a quantificação de cada aspecto referente à simulação será disposta nos capítulos a seguir.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 PLENÁRIO ULYSSES GUIMARÃES

O plenário Ulysses Guimarães está localizado na Câmara dos Deputados no edifício do Congresso Nacional, Brasília - DF. É o maior e principal plenário na atual conjuntura política brasileira, palco de discussões e votações de leis que regem a vida de todos os cidadãos brasileiros.

Nesta etapa do trabalho objetiva-se aplicar a metodologia proposta para avaliação de um ambiente condicionado, com ocupação variável, operando com recuperação de energia, vazão de ar exterior variável e com free cooling. O ambiente em estudo apresenta um perfil de ocupação extremamente variável, o que favorece na avaliação destas tecnologias, pois a variação da carga térmica interna está diretamente associada ao consumo de energia nos dispositivos de climatização mecânica.



Figura 5.1 Congresso Nacional (UVB, 2016)



Figura 5.2 Plenário Ulysses Guimarães (HojeLivre, 2014)

5.2 CÁLCULO CARGA TÉRMICA

A carga térmica consiste na energia retirada (ou fornecida) ao ambiente a fim de manter as condições de temperatura dentro um intervalo pré-estabelecido nas zonas ocupadas. Para o estudo de caso realizado, esta metodologia conduzirá a obtenção de uma solução ótima que minimize a carga térmica total a ser retirada do ambiente e consequentemente o consumo de energia em diversos cenários.

Os cálculos referentes às cargas internas são efetuados separando as transferências de calor por convecção e das transferências por radiação, pois esta última induz um atraso no tempo devido a transferência entre superfícies (inércia térmica).

Desta maneira, para que o *software* EnergyPlus seja capaz de fornecer resultados precisos, é necessário a caracterização de vários parâmetros:

- Cidade de projeto;
- Estrutura física do ambiente (dimensões);
- Envoltória do ambiente (tipo de materiais);
- Fontes internas de calor (iluminação, equipamentos, ocupantes, etc.);
- Perfil de ocupação;
- Sistema de climatização;

As principais características que foram consideradas para a definição do ambiente, bem como para o cálculo das cargas térmicas estão dispostos na Tabela 5.1. O ambiente foi considerado sem janelas e com paredes que não apresentam transferência de energia, pois estão em contato com ambientes climatizados.

Tabela 5.1 Características do ambiente escolhido

Parâmetro	Valor
Área	683 m ²
Pé direito	11,4 m ²
Ocupação máxima	450 pessoas
Cidade de projeto	Brasília/DF
Temperatura interna de conforto	23° C
Carga de iluminação	32 W/m ²
Carga de equipamentos elétricos	3000 W
Taxa de infiltração	10 L/s.m ²
Carga de ocupação	130 W/pessoa, conforme perfil de ocupação
Carga de ventilação do ar externo	Conforme perfil de ocupação e tipo de solução adotada*

(*a carga térmica devida ao ar externo varia de acordo com a solução em destaque)

5.2.1 Cidade de projeto

Para caracterização da cidade de projeto, os dados de entrada foram baseados nas condições climáticas do local. As temperaturas e umidades relativas da cidade de projeto são parâmetros de entrada para o sistema, uma vez que influenciam o funcionamento do recuperador de energia, carga térmica do ar externo e o funcionamento do ciclo de compressão a vapor do equipamento de ar condicionado.

A Figura 5.3 apresenta o perfil de temperatura de bulbo seco e sua média móvel para as 8760 horas de um ano e analogamente, a Figura 5.4 representa o perfil de umidade relativa e sua média móvel para a cidade de Brasília/DF segundo um ano típico, este ano leva em consideração as temperaturas e umidades dos últimos 20 anos (INMET).

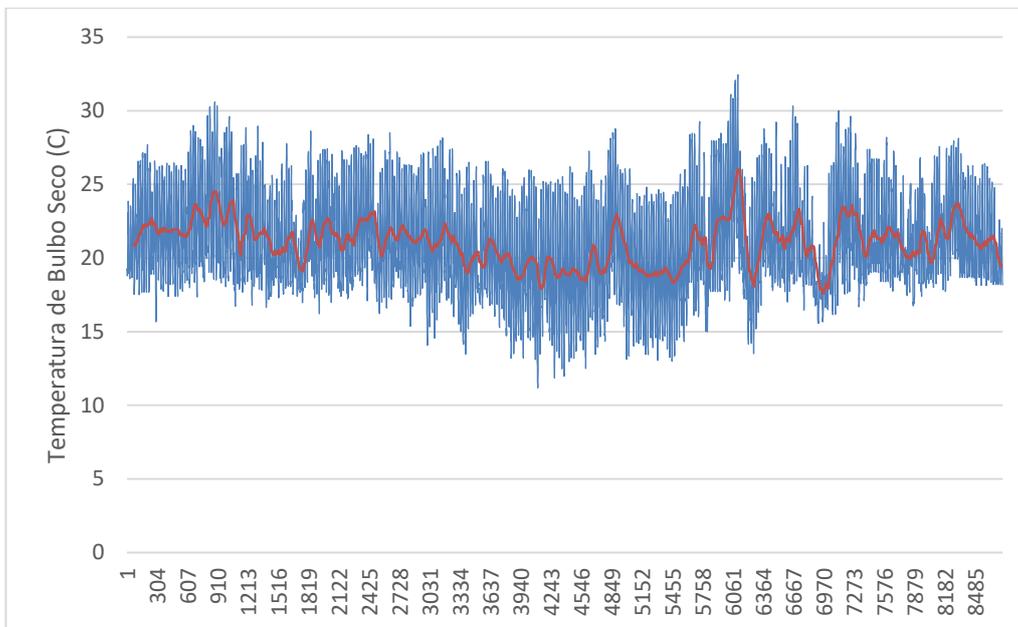


Figura 5.3 Temperatura de bulbo seco para um ano típico em Brasília

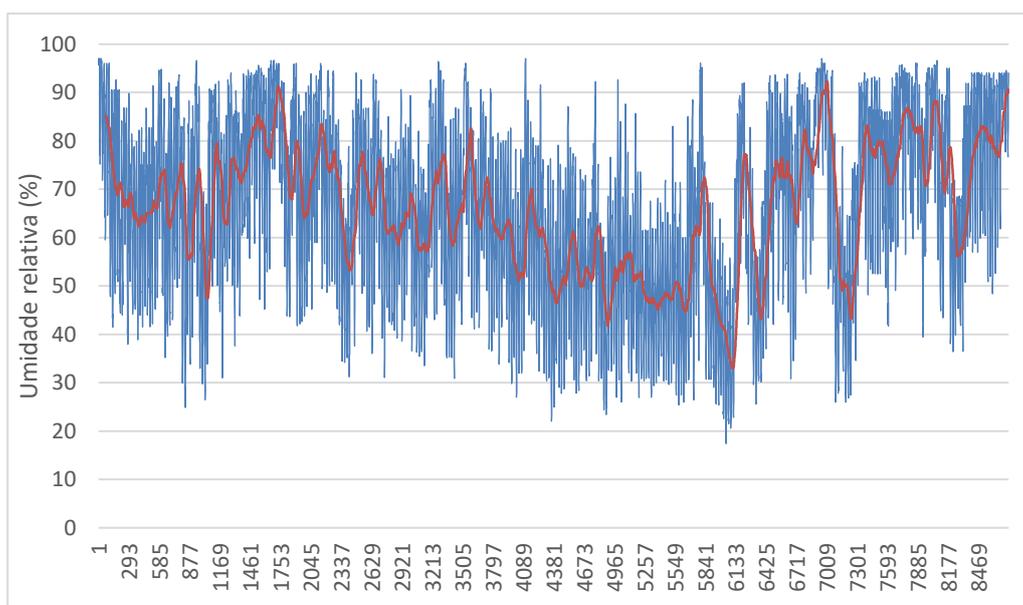


Figura 5.4 Umidade relativa do ar para um ano em Brasília

5.2.2 Estrutura física

A cúpula é toda feita de concreto armado, formada por três cascas e pilares em uma solução estrutural complexa e sem precedentes. Sua estrutura apresenta diâmetro externo de 29,87 m e interno de 25,30 m. Possui uma área total de 2.456,00 m² dividido por quatro níveis, sendo no primeiro e principal nível, o Plenário propriamente dito, com aproximadamente 683m² e pé-direito de 11,40 m, conforme mostra a Figura 5.5 e a Figura 5.6.

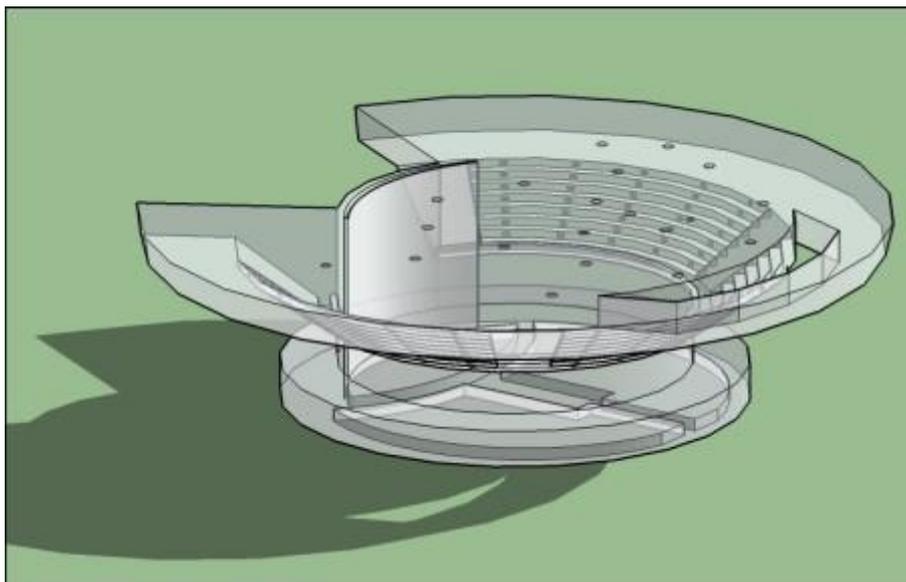


Figura 5.5 Vista isométrica Plenário Ulysses Guimarães (PRUDENTE, 2017)

No Plenário estão dispostas em arco, divididas em duas alas e separadas por um corredor central, poltronas e bancadas destinadas aos parlamentares. O piso inferior dispõe de 433 cadeiras para os parlamentares, são 396 poltronas para votação, incluindo duas para portadores de necessidades especiais, além de 48 cadeiras laterais. À frente do Plenário, em um plano elevado cerca de 1,50m do nível em que estão as poltronas, encontra-se a tribuna onde fica posicionada a mesa em que tomam assento os parlamentares que compõem a Mesa Diretora da Câmara, ou que dirigem as sessões, como pode ser visualizado pela Figura 5.6 e Figura 5.7.

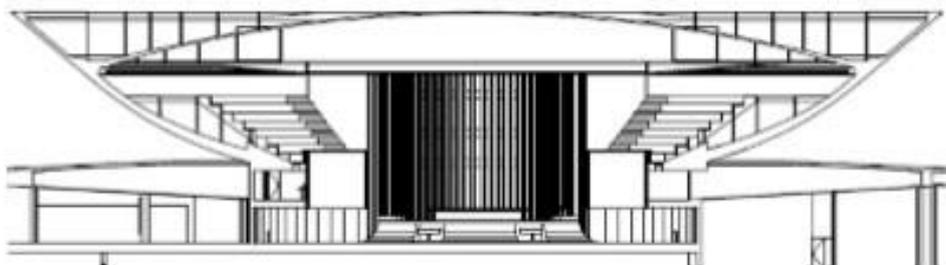


Figura 5.6 Vista lateral Plenário Ulysses Guimarães (Mansano, 2013)

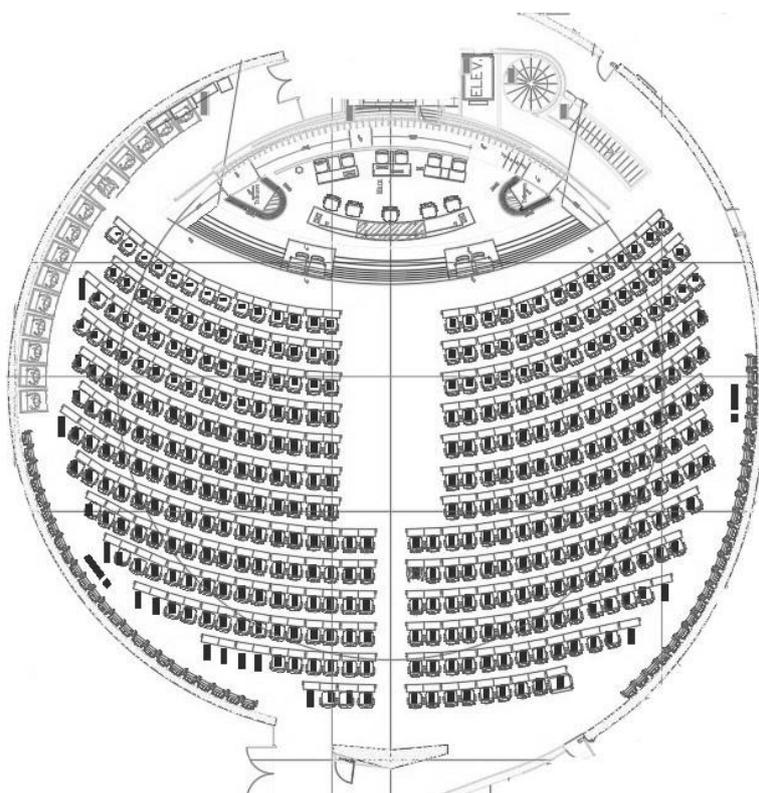


Figura 5.7 Vista superior Plenário Ulysses Guimarães

5.2.3 Envoltória

Quanto aos acabamentos e revestimentos o Plenário possui piso e paredes revestidos de carpete na cor prata, cinza clara, produzida exclusivamente para este local. Atrás da Mesa Diretora há um painel em lâminas de alumínio natural e vidro fumê, sendo a parede por trás do vidro pintada de preto, dando-lhe assim o efeito de espelhamento. As poltronas dos parlamentares são em couro cinza escuro e as bancadas em ipê com acabamento em verniz brilhante. O forro apresenta arquitetura em colmeia de barras de alumínio, com malha de 7,5x 7,5cm e 7,5cm de altura, pintura na cor branca e preso à laje a uma distância de 0,50 m. A laje, acima do forro, recebe chapisco grosso e pintura branca (Mansano, 2013).

5.2.4 Perfil de ocupação

O perfil de ocupação é o principal fator num cálculo de carga térmica no caso do Plenário, pois a sua principal atividade é realizada devido à ocupação existente. Por se tratar de um tipo de ambiente com ocupação muito variável, foi considerado um regime de operação que corresponde à realidade. Para efeitos de simulação, foi considerado um perfil de ocupação semanal típico que se repete durante todas as semanas do ano, de Janeiro até Dezembro. A Tabela 5.2 apresenta um perfil de ocupação com os horários e os respectivos percentuais relativos à ocupação máxima (450 pessoas) ao longo da semana.

Tabela 5.2 Perfil de ocupação semanal típico para aplicação de plenário após consulta ao local
em %

Horário	Dom.	Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sab.
08:00	0	5	5	25	25	5	0
09:00	0	20	25	50	50	25	0
10:00	0	25	50	50	100	25	0
11:00	0	25	50	50	100	25	0
12:00	0	5	5	0	5	5	0
13:00	0	5	5	5	5	5	0
14:00	0	10	25	25	25	5	0
15:00	0	20	75	75	25	5	0
16:00	0	20	100	100	25	5	0
17:00	0	20	100	100	25	5	0
18:00	0	20	100	100	25	5	0
19:00	0	5	100	100	5	5	0
20:00	0	5	100	100	5	5	0
21:00	0	5	25	50	5	5	0
22:00	0	0	0	25	0	0	0

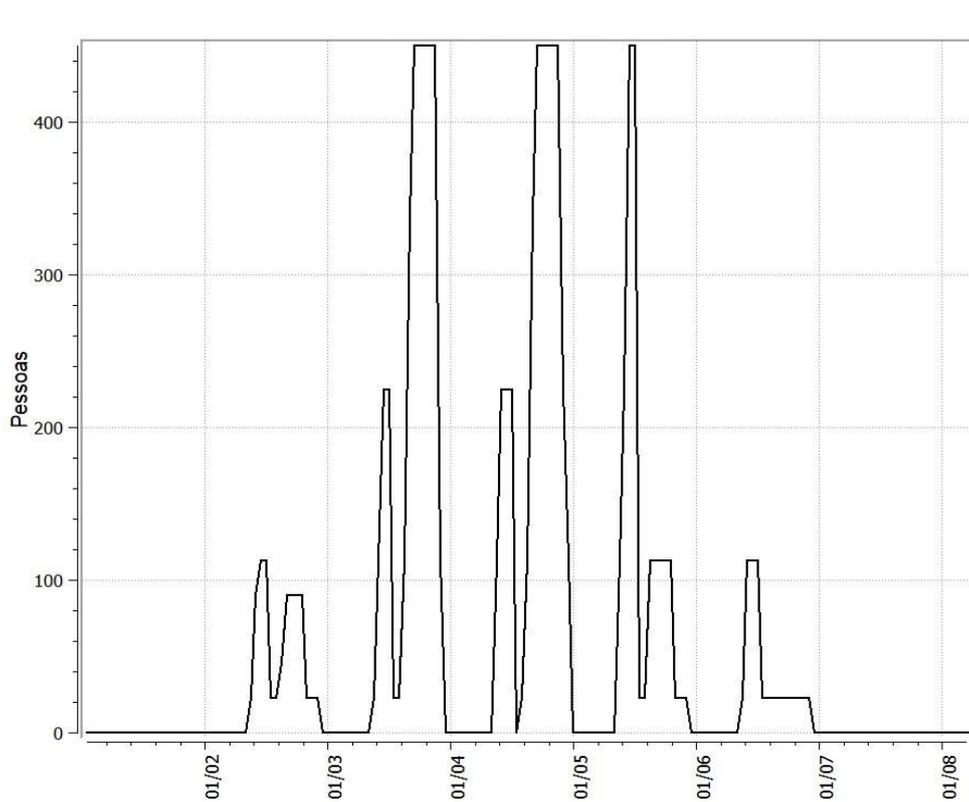


Figura 5.8 Perfil de ocupação semanal

5.2.5 Sistema de climatização

A climatização do Plenário é realizada através de uma central de água gelada (CAG), responsável por atender os edifícios Anexo I e Principal, onde se encontra o plenário. A CAG está localizada no subsolo, entre o Edifício Principal e o espelho d'água ao lado do edifício Anexo I, e é composta pelos equipamentos a seguir:

- 3 equipamentos de resfriamento de líquidos (*chiller*) com capacidade de 250 TR cada;
- 4 Torres de Resfriamento (TRA) com capacidade de 190 TR cada;
- 4 Bombas de Água de Condensação (BAC);
- 2 Bombas de Água Gelada Secundária Principal (BAG/SP) – climatização do Edifício Principal;
- 2 Bombas de Água Gelada Secundária Anexa (BAG/AS) – climatização do edifício Anexo I;

No Plenário estão dispostos os seguintes equipamentos de climatização:

1. Dois condicionadores de ar, *fan coil* com capacidade de 34 TR cada, atualmente apenas um está em funcionamento;
2. Dois ventiladores para captação de ar externo de 5 cv de potência e capacidade de vazão de 6000 m³/h;
3. Vinte e sete difusores de ar do tipo circular de 50 cm de diâmetro;

A Figura 5.9 ilustra a disposição dos dutos de insuflamento e o posicionamento de cada difusor.

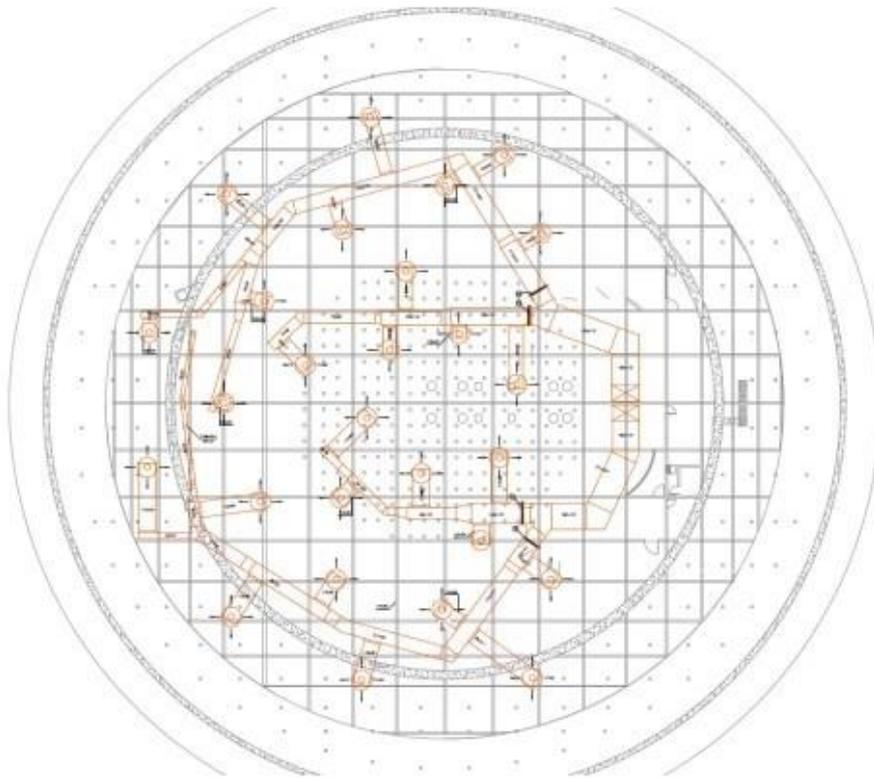


Figura 5.9 Vista superior da rede de dutos (BRASIL, 2017)

5.2.6 Perfil de carga térmica

O perfil de carga térmica foi levantado de acordo com as informações relacionadas à envoltória do plenário, juntamente com os dados apresentados na Tabela 5.1 e com o perfil de ocupação apresentado na Tabela 5.2. Para o levantamento do perfil de carga térmica foram utilizados os *softwares* OpenStudio e EnergyPlus do departamento de energia dos Estados Unidos. O componente de carga térmica devido ao ar de renovação é calculado separadamente, uma vez que o valor da carga depende do uso ou não dos sistemas de recuperação de energia, de controle de vazão de ar externo e de free cooling.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam a variação de carga térmica ao longo do ano e o perfil de carga térmica semanal respectivamente.

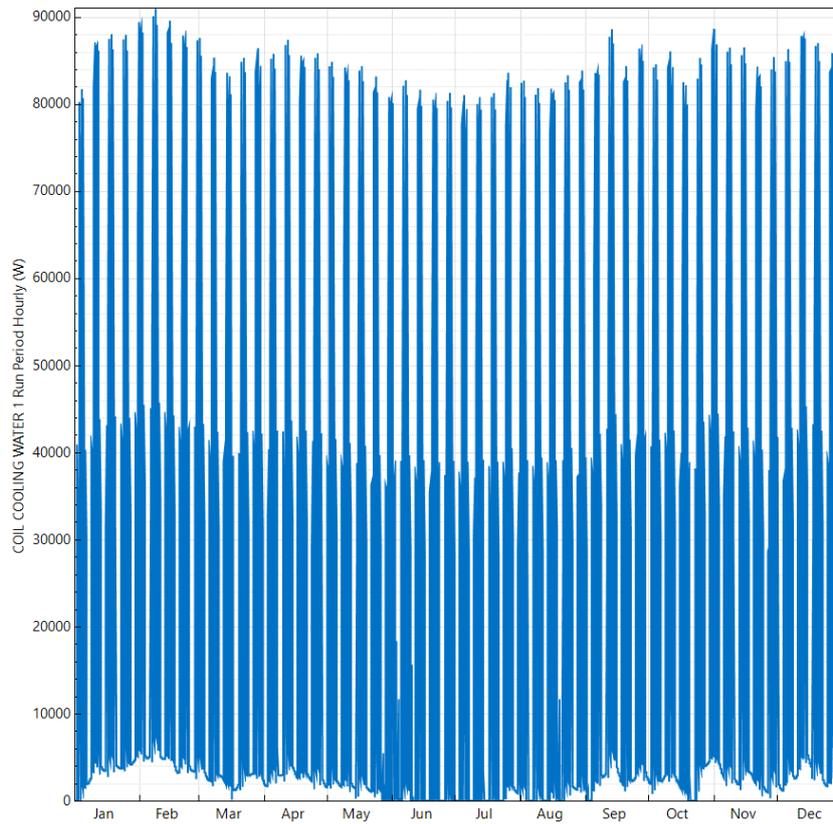


Figura 5.10 Variação de carga térmica total avaliada para cada hora de um ano típico

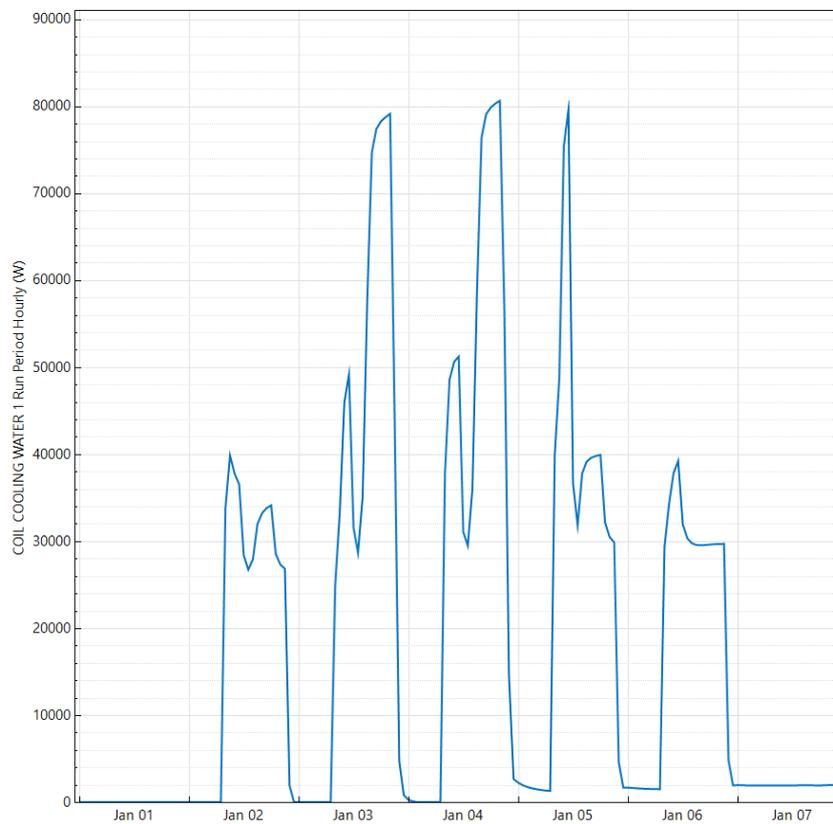


Figura 5.11 Perfil de carga térmica semanal

5.3 VAZÃO DE AR EXTERNO

Para caracterização do sistema de controle de vazão de ar exterior, foram utilizadas as duas metodologias propostas pela norma ABNT NBR16401-3. Primeiramente foi calculada a vazão eficaz de ar exterior que é constituída pela soma de duas partes, avaliadas separadamente: a vazão relacionada às pessoas e a vazão relacionada à área ocupada, como exemplificado na Equação 3.1. A partir dessas taxas é possível calcular o valor exato da vazão requerida de ar externo para cada hora do dia, de acordo com o perfil de ocupação original apresentado anteriormente. A Tabela 5.3 apresenta os valores a serem utilizados para o cálculo das taxas de renovação de ar da norma. Para a realização das simulações, foram utilizados os valores de vazão de ar externo requeridos para o nível 1 de um edifício público – Plenário Legislativo, considerando que a taxa de renovação é zero quando o ambiente está desocupado.

Tabela 5.3 Parâmetro para cálculo vazão eficaz (ABNT NBR 16401-3, 2008)

Local	D pessoas/ 100 m ²	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Exaustão mecânica L/s* m ² a
		F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	
Edifícios públicos								
Aeroporto – saguão ^c	15	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5	--
Aeroporto – sala de embarque ^c	100	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5	--
Biblioteca	10	2,5	0,6	3,5	0,8	3,8	0,9	--
Museu, galeria de arte ^d	40	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5	--
Local de culto	120	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5	--
Legislativo – plenário	50	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5	--
Teatro, cinema, auditório – lobby	150	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5	--

Desta forma, o valor máximo de vazão de ar exterior utilizado durante a ventilação é de 1332 L/s. Este parâmetro foi utilizado para as simulações através do perfil de ocupação, onde foi possível realizar comparações em diferentes cenários estudados.

Posteriormente, foi realizada uma análise como indica o Anexo C da norma ABNT NBR 16401-3, onde é feito um controle da vazão de ar exterior através da concentração de dióxido de carbono no ar do ambiente. O sistema de ventilação funcionaria não mais com relação à ocupação e sim com relação à concentração de CO₂ em ppm para manter uma boa qualidade do ar interior dentro do ambiente. Uma comparação relacionando a quantidade de ar exterior inserida no ambiente e a QAI entre o controle por concentração de CO₂ e o sistema de controle de vazão por demanda também foi realizado.

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Foram realizadas simulações em diferentes cenários de operação do ambiente adotado para estudo. A divisão dos cenários foi realizada com base na solução de projeto selecionada para cada situação, considerando o mesmo ambiente a ser condicionado, com o mesmo perfil de ocupação proposto durante um ano de operação.

6.1.1 Cenário 1: Solução convencional (atual)

O primeiro cenário consiste no modelo da atual situação na qual se encontra o sistema de climatização do plenário, ou seja, sem utilização de recursos como a vazão de ar exterior variável, de recuperação de energia e de free cooling. Este cenário será utilizado como base para meios de comparação com as demais soluções propostas, uma vez que os valores de vazão de ar de renovação se encontram no máximo.

A vazão de ar exterior é constante e igual à máxima vazão calculada de 1332 L/s, considerando a ocupação de 100% de pessoas durante todo o período de utilização. A Figura 6.1 apresenta um modelo esquemático da solução e a Figura 6.2 indica os valores de carga térmica total durante um ano.

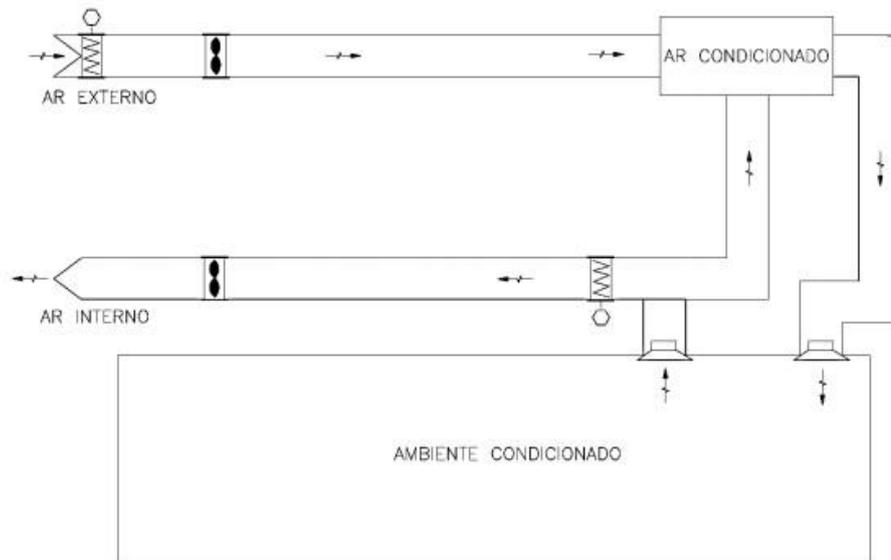


Figura 6.1 Modelo esquemático cenário 1 (VALVERDE, 2016)

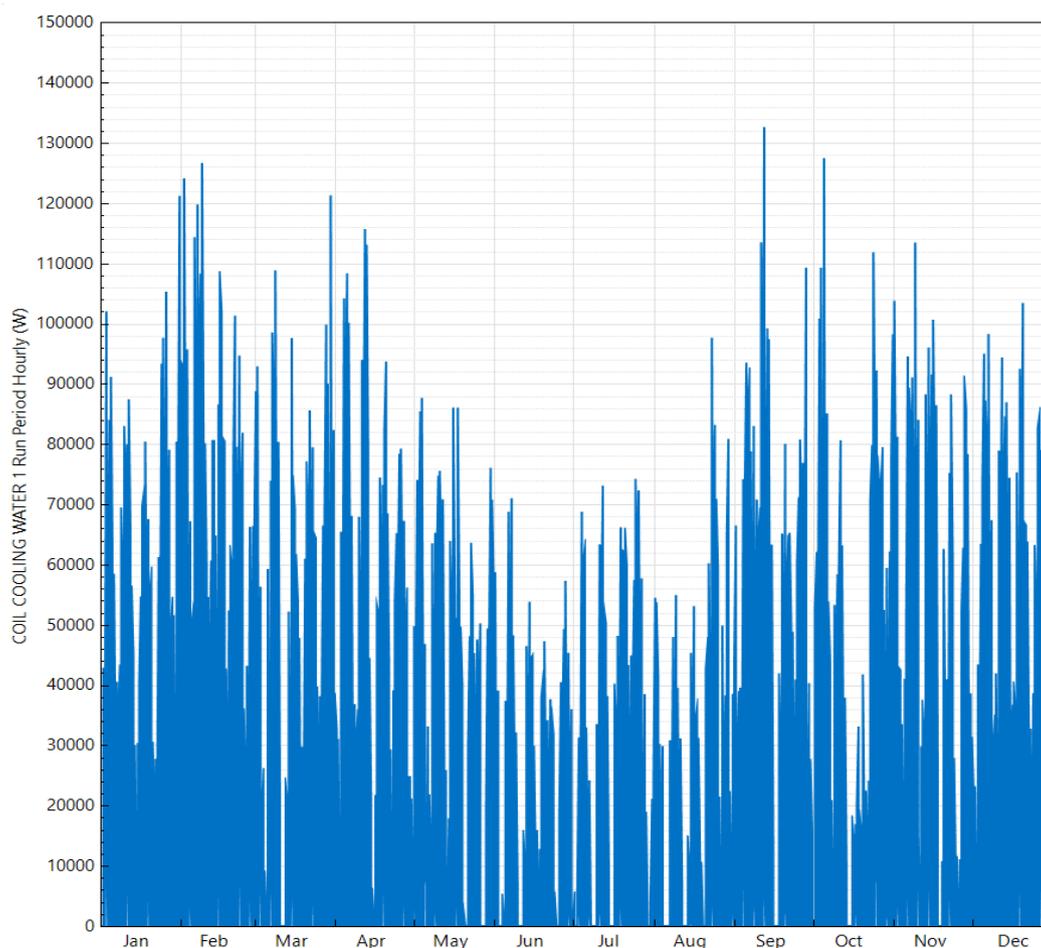


Figura 6.2 Variação carga térmica anual cenário 1

Pode-se perceber que o efeito da sazonalidade na carga térmica é bem influente, isso ocorre principalmente devido ao ar de renovação inserido. O consumo de energia elétrica anual do sistema de ar condicionado deste cenário é de aproximadamente 58.133 kWh, enquanto a carga térmica de pico é de 135 kW.

6.1.2 Cenário 2: Solução com controle de vazão de ar exterior

O segundo cenário consiste na utilização de dispositivo de controle de vazão de ar exterior. Nesta solução a taxa de ar de renovação insuflada no ambiente varia de acordo com a ocupação momentânea do local. Os valores de ar de renovação utilizados são os calculados segundo o cálculo de vazão eficaz associado ao número de ocupantes do ambiente.

A Figura 6.3 apresenta um modelo esquemático do cenário 2, a Figura 6.4 indica os valores de carga térmica total durante uma semana do cenário 1 e 2, possibilitando assim compará-los e a Figura 6.5 indica a variação da diferença dos valores de carga térmica entre os cenários 1 e 2 ao longo de um ano.

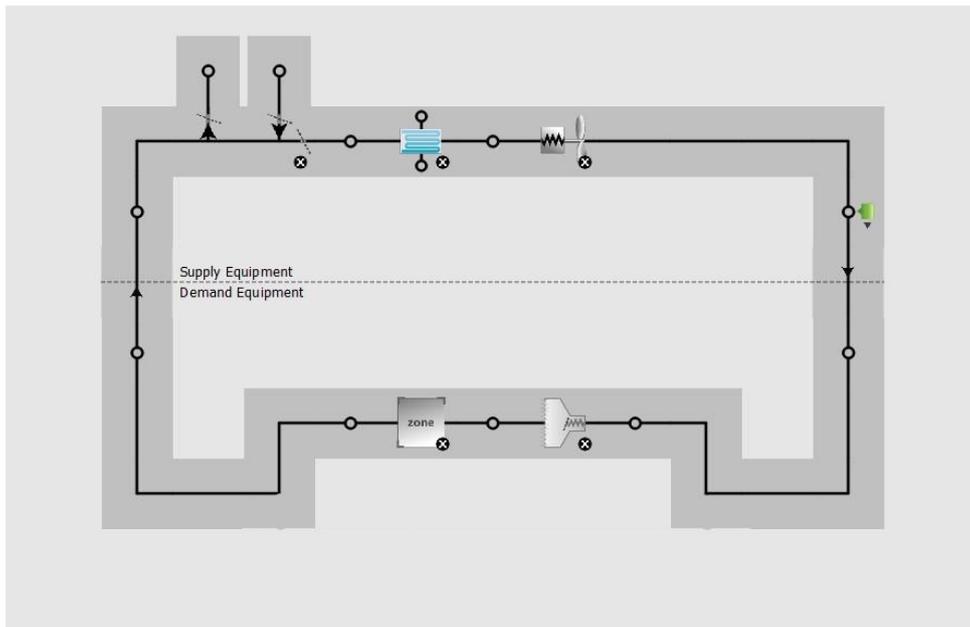


Figura 6.3 Modelo esquemático cenário 2

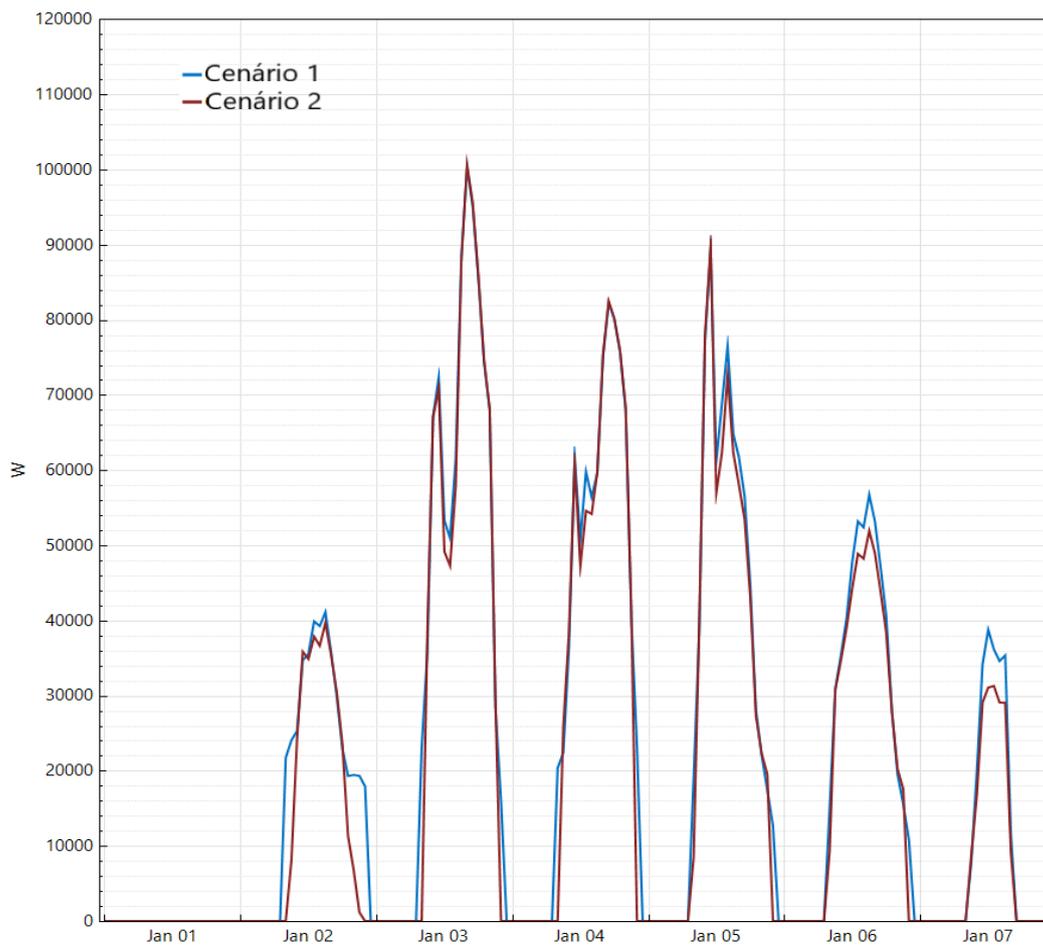


Figura 6.4 Comparação carga térmica semanal cenário 1 e 2

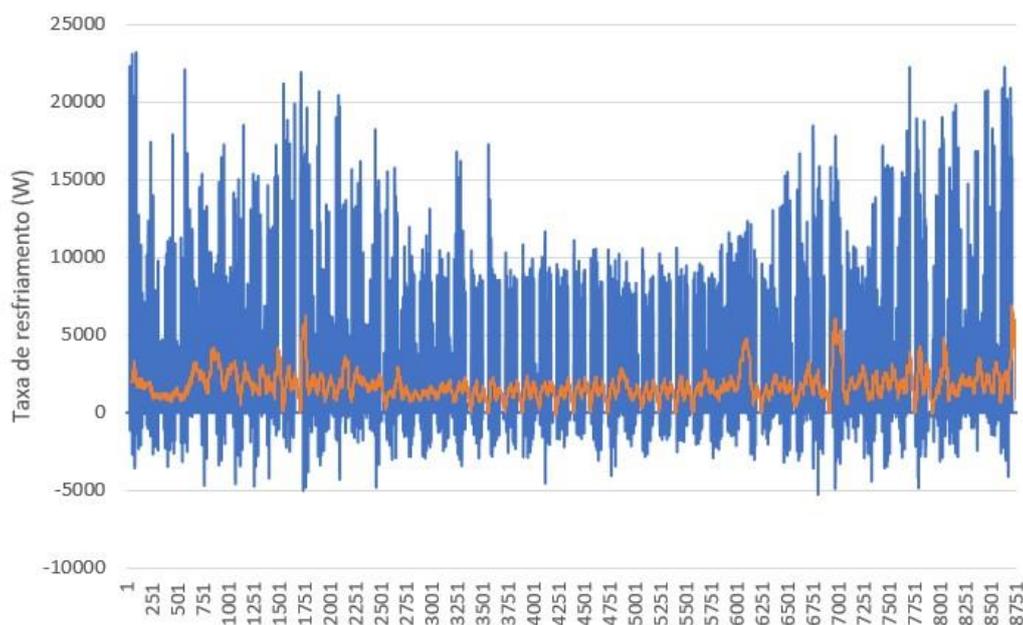


Figura 6.5 Diferença carga térmica anual entre cenário 1 e 2

É possível notar neste caso uma redução no consumo de energia elétrica anual considerável, visto que esta solução apresenta o consumo de 42.833 kWh, aproximadamente 9,11% de economia. A carga térmica de pico é de 133,5 kW representando uma redução de pouco mais de 1%. Com relação a este parâmetro não há grande alteração, isto se comprova, pois em casos máximos os dois cenários se comportam de forma semelhante.

Os valores negativos observados no gráfico representam instantes que a solução proposta pelo cenário 2 apresentou resultados piores que a solução convencional. Desta forma o ideal seria uma combinação para que seja utilizado o melhor de cada uma das soluções.

6.1.3 Cenário 3: Solução convencional com dispositivo ERV

O terceiro cenário consiste na utilização de dispositivo *energy recovery ventilator*. Nesta solução o dispositivo ERV será responsável pela transferência de calor entre o ar de renovação e o ar de exaustão. A taxa de ar de renovação insuflada no ambiente permanecerá constante durante o período ocupado do local. O terceiro cenário utiliza os mesmos parâmetros do primeiro, com adição do dispositivo ERV.

A Figura 6.6 apresenta um modelo esquemático da solução, a Figura 6.7 indica os valores de carga térmica total durante uma semana do cenário 1 e 3, possibilitando assim compará-los e a Figura 6.8 indica a variação da diferença dos valores de carga térmica entre os cenários 1 e 2 ao longo de um ano.

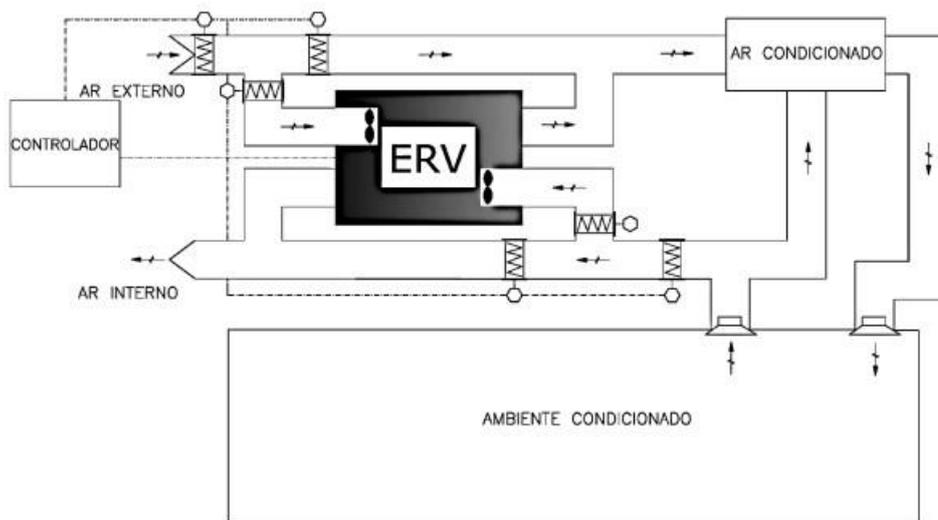


Figura 6.6 Modelo esquemático cenário 3 (VALVERDE, 2016)

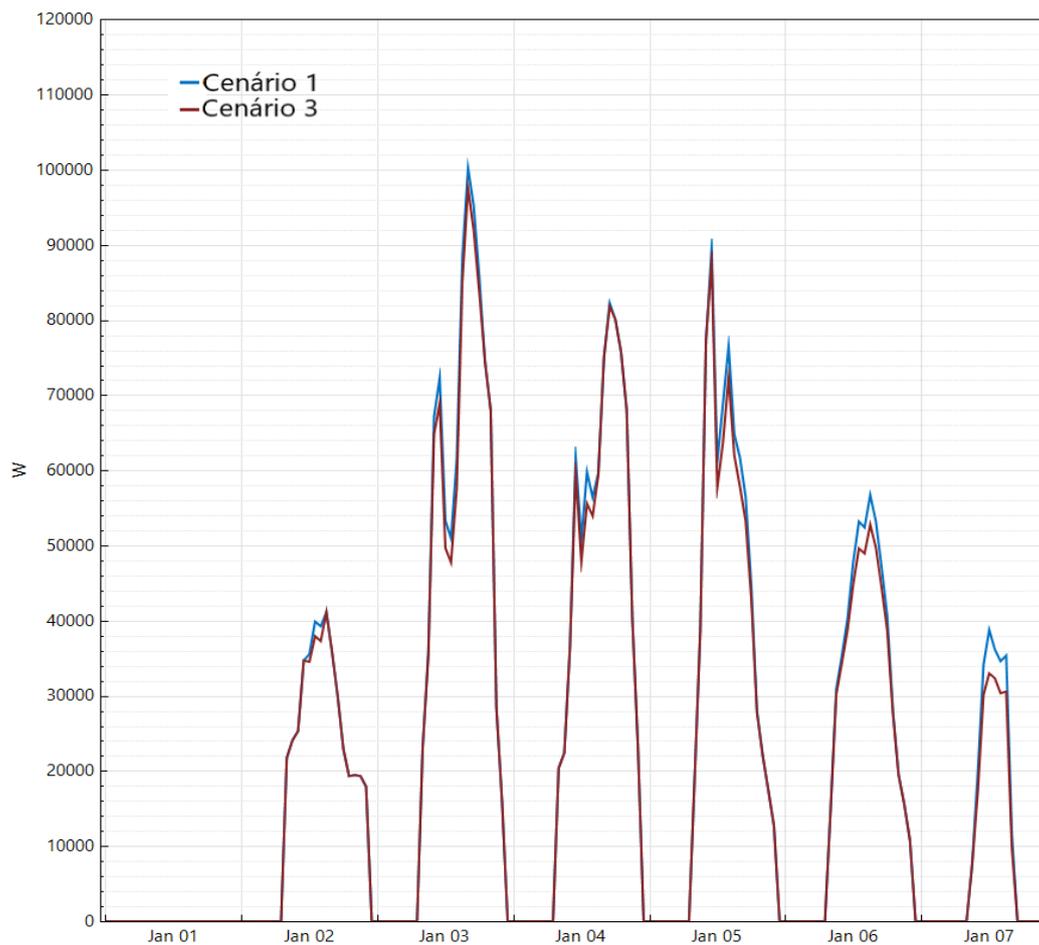


Figura 6.7 Comparação carga térmica semanal cenário 1 e 3

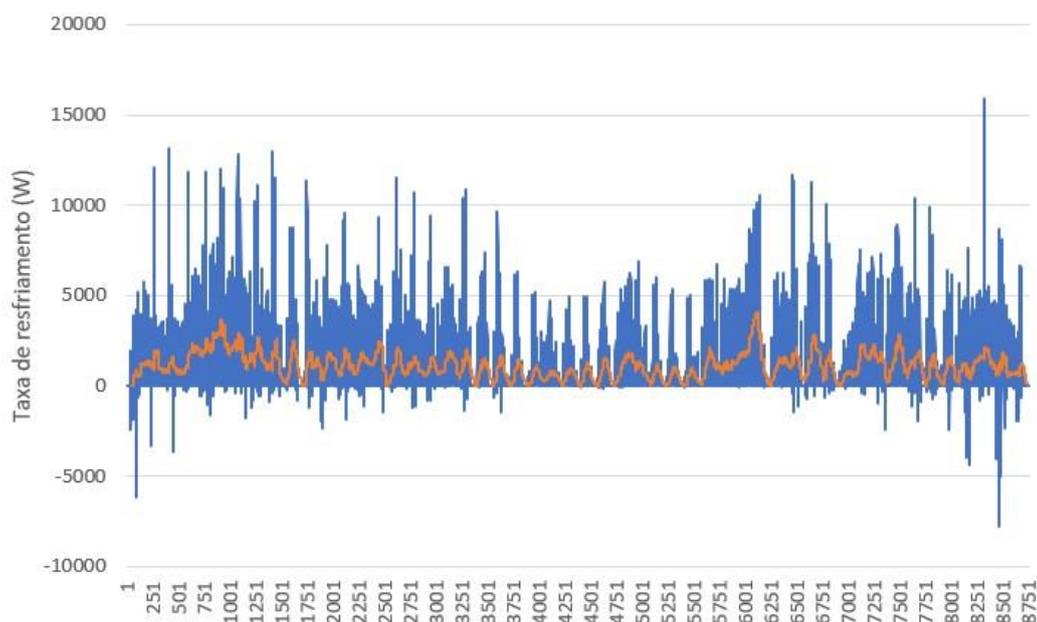


Figura 6.8 Diferença carga térmica anual entre cenário 1 e 3

Nota-se, portanto, uma redução na carga térmica de pico de 135 kW para 126,2 kW, o que representa uma redução percentual de aproximadamente 6,5%. Neste caso é possível notar uma redução da capacidade de resfriamento dos equipamentos do sistema de climatização. Com relação ao consumo energético anual, a solução proposta também apresentou uma redução, de 58.133 kWh para 56.333 kWh, o que representa uma redução percentual de aproximadamente 3,1%.

6.1.4 Cenário 4: Solução conjunta

O quarto cenário consiste na utilização de ambos os recursos propostos, tanto de recuperação de energia como o de controle de vazão de ar exterior. Nesta solução a vazão de ar externo é variável, de acordo com a ocupação, como feito no segundo cenário, além disso, é adicionado o dispositivo ERV para a transferência de calor entre o ar externo a ser inserido no ambiente e o ar contaminado que será retirado do mesmo.

A Figura 6.9 apresenta um modelo esquemático da solução proposta, a Figura 6.10 indica os valores de carga térmica total durante uma semana do cenário 1 e 4, possibilitando assim compará-los e a Figura 6.11 indica a variação da diferença dos valores de carga térmica entre os cenários 1 e 4 ao longo de um ano.

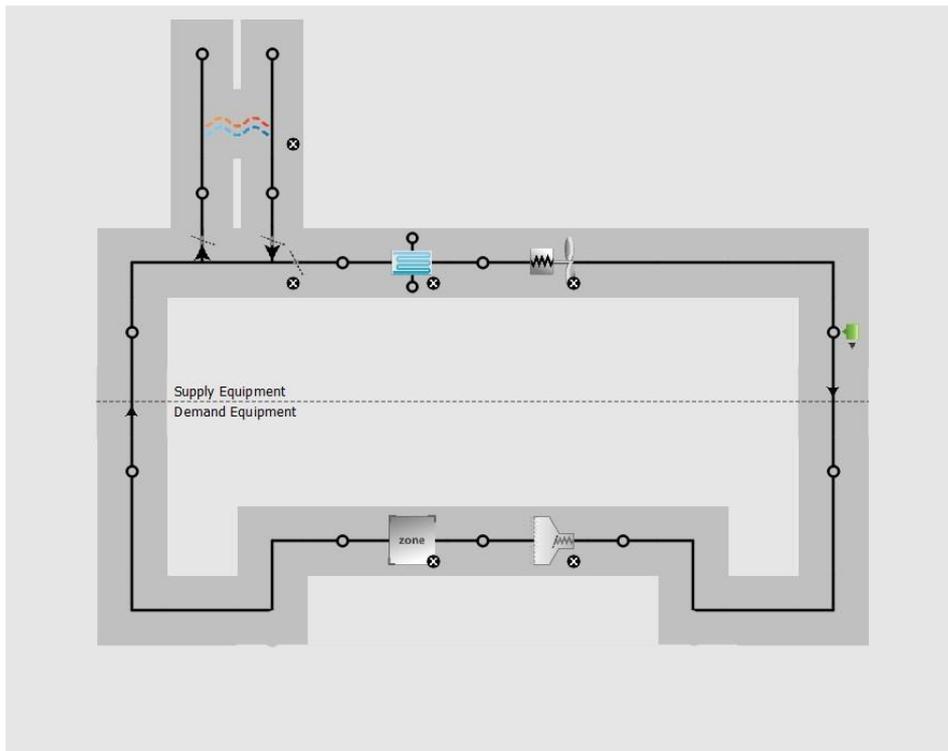


Figura 6.9 Modelo esquemático cenário 4

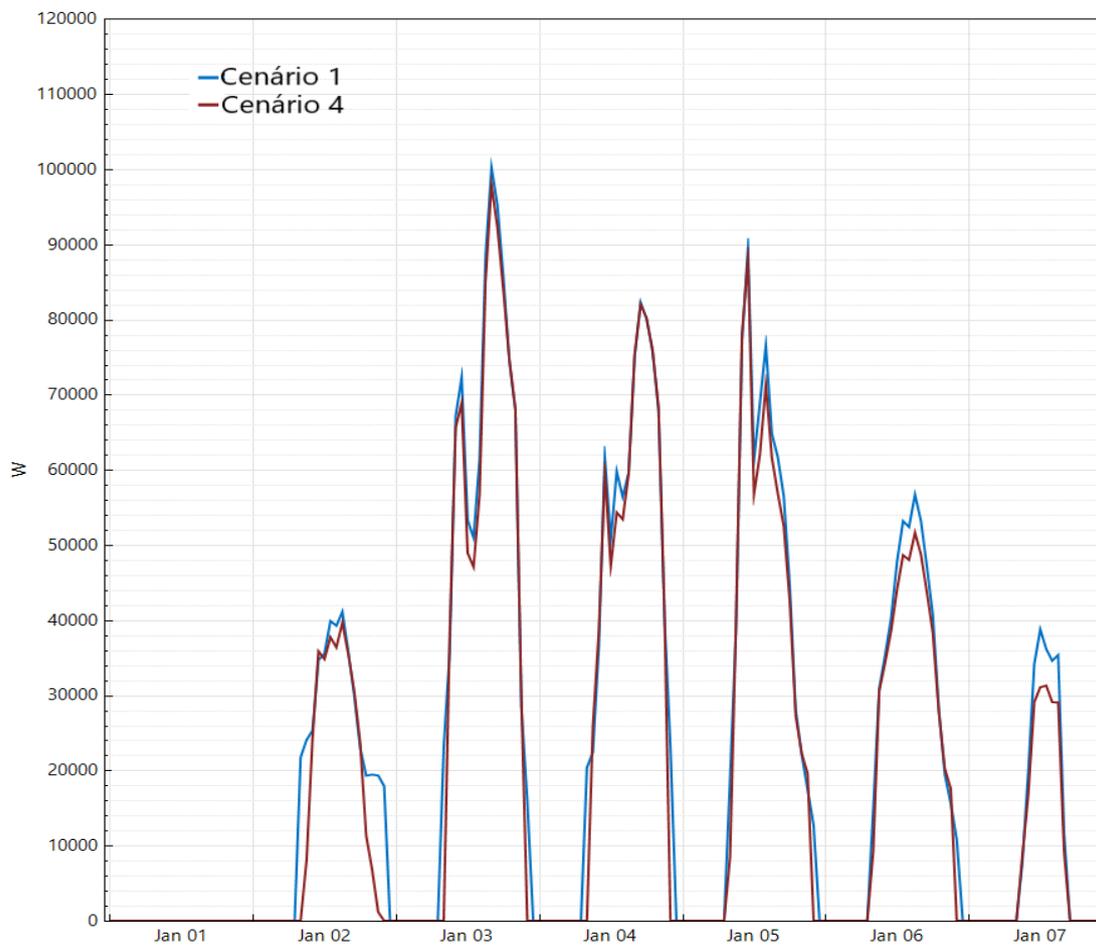


Figura 6.10 Comparação carga térmica semanal cenário 1 e 4

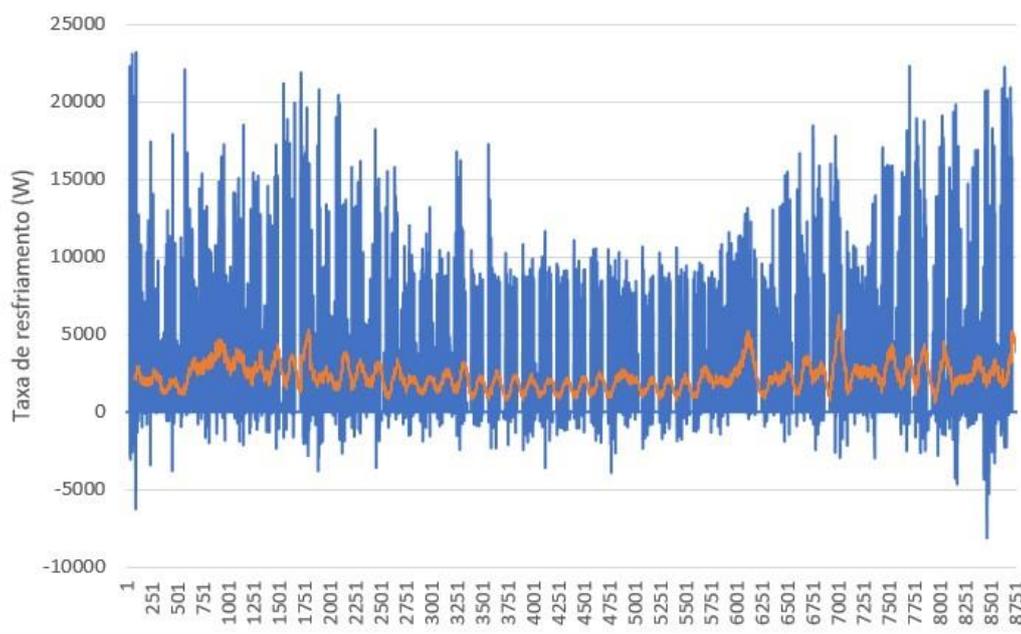


Figura 6.11 Diferença carga térmica anual entre cenário 1 e 4

É possível notar neste caso, assim como no cenário 3, uma redução na carga térmica de pico de 135 kW para 126,4 kW, o que representa uma redução percentual de aproximadamente 6,4%. Com relação ao consumo energético anual, a solução proposta também apresentou uma redução, com valor significativo assim como o cenário 2, de 58.133 kWh para 51.644 kWh, o que representa uma redução percentual de aproximadamente 11,2%.

6.1.5 Cenário 5: Solução com free cooling associado à vazão variável

O quinto cenário avaliado consiste na utilização de dispositivo de controle de vazão de ar exterior, assim como no cenário 2, em conjunto com um water-side economizer e um air-side economizer atuando para fornecer free cooling. Nesta solução o ar de renovação insuflado no ambiente, antes de ser resfriado pelo *fan coil*, é pré resfriado pela serpentina de free cooling ilustrada na Figura 4.4 **Modelo esquemático ciclo free cooling (OpenStudio)** caso as condições climáticas permitam. Adicionalmente a este processo, quando o ar externo estiver em condições de temperatura inferior ao ar interno, a vazão do mesmo é aumentada para máxima. Neste cenário, a serpentina de free cooling só é utilizada caso a temperatura da água do ciclo de condensação, ou seja, a água da torre de resfriamento, esteja a abaixo de 20 °C, para que esse sistema só entre em operação caso possa proporcionar o pré resfriamento, diminuindo assim o consumo no *chiller*.

A Figura 6.12 apresenta um modelo esquemático da solução proposta, a Figura 6.13 indica os valores de carga térmica total durante uma semana do cenário 1 e 5, possibilitando assim compará-los e a Figura 6.14 indica a variação da diferença dos valores de carga térmica entre os cenários 1 e 5 ao longo de um ano.

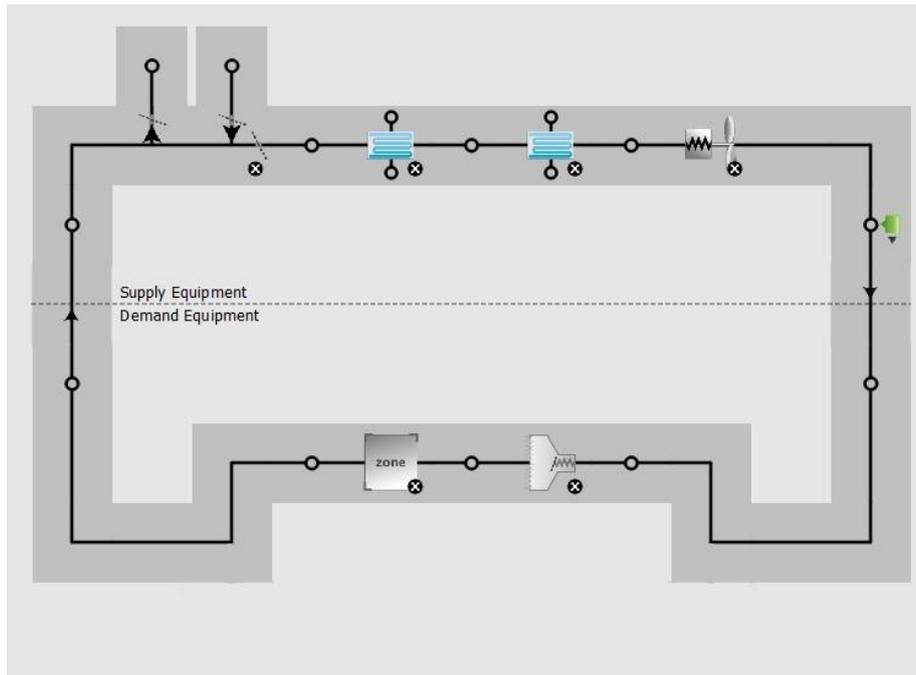


Figura 6.12 Modelo esquemático cenário 5

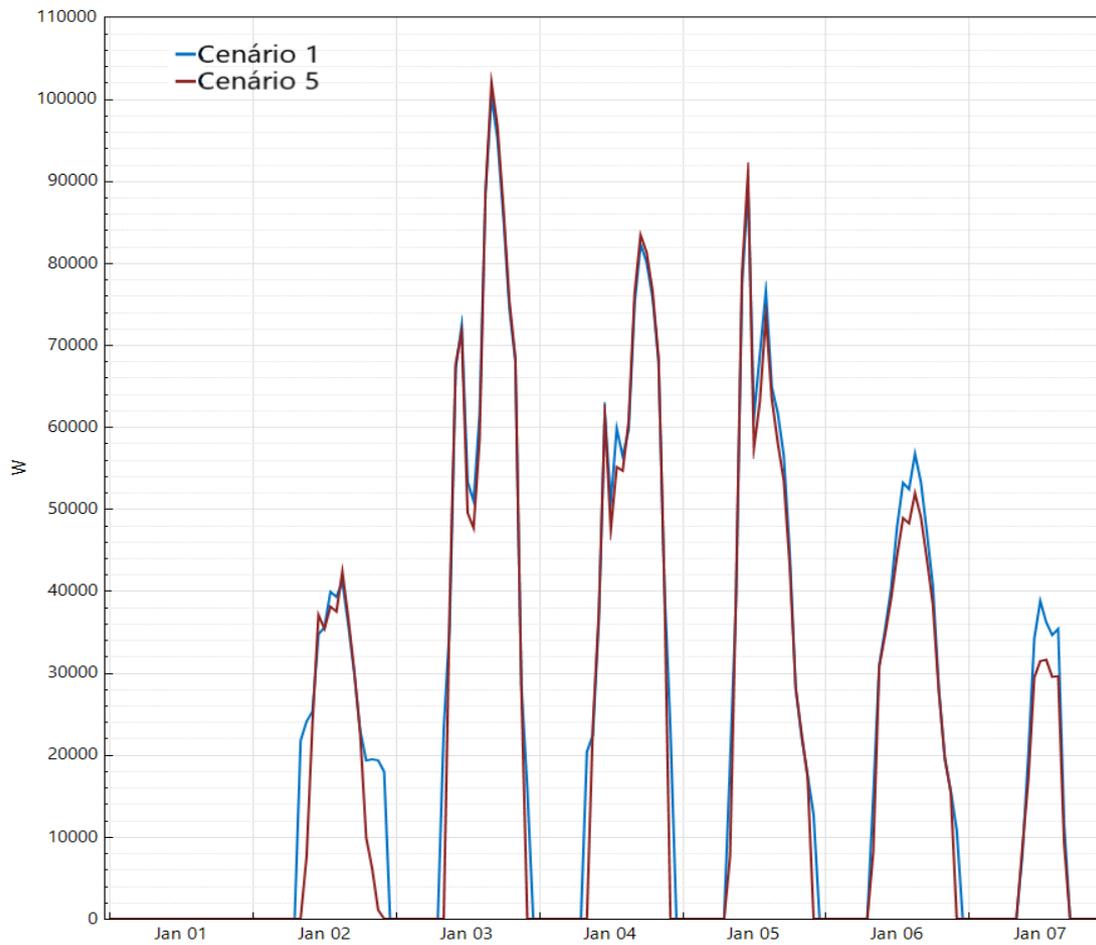


Figura 6.13 Comparação carga térmica semanal cenário 1 e 5

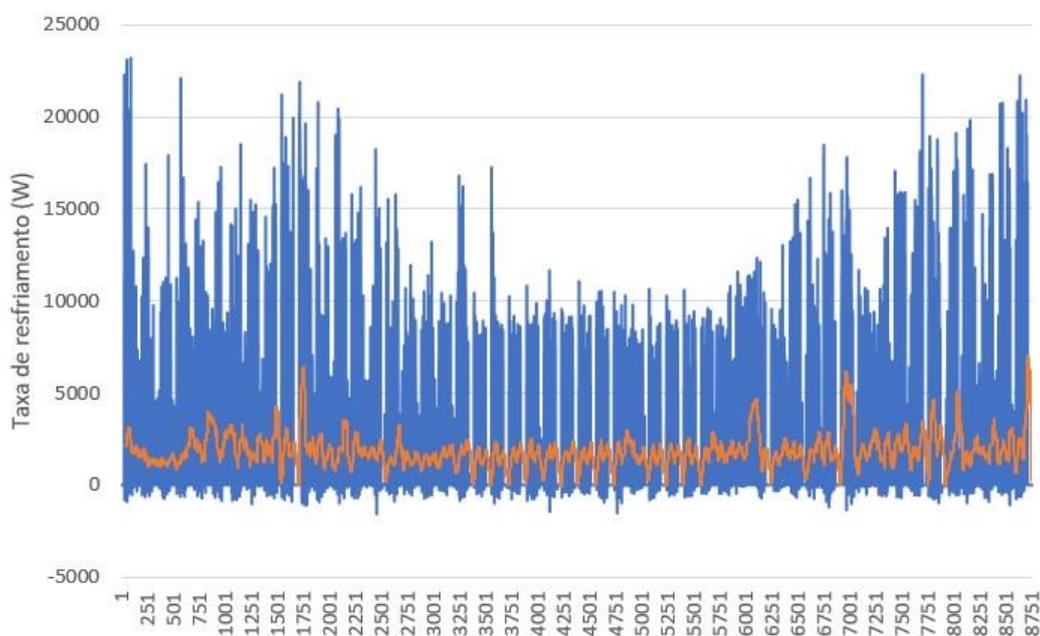


Figura 6.14 Diferença carga térmica anual entre cenário 1 e 5

É possível notar neste caso, assim como no cenário 3, que a carga térmica de pico não sofreu alteração, pois em condições de operação máxima ambos cenários atuam de forma semelhante. Com relação ao consumo energético anual, a solução proposta apresentou a maior redução entre todos os cenários avaliados, com valor significativo de 58.133 kWh para 46.350 kWh, o que representa uma redução percentual de aproximadamente 20%.

6.2 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS

A partir dos resultados apresentados é possível realizar uma análise comparativa entre os cenários com o objetivo de verificar a economia de energia proporcionada pelos recursos apresentados.

Outra análise comparativa realizada é com relação às cargas térmica de pico de cada solução proposta. Esta avaliação permite reduzir a capacidade de resfriamento do sistema de climatização, o que pode implicar em trocas de equipamentos com capacidades distintas, proporcionando grande economia.

A Figura 6.15 apresenta os dados de consumo anual para cada cenário avaliado e a Figura 6.16 ilustra a carga térmica de pico das soluções propostas.

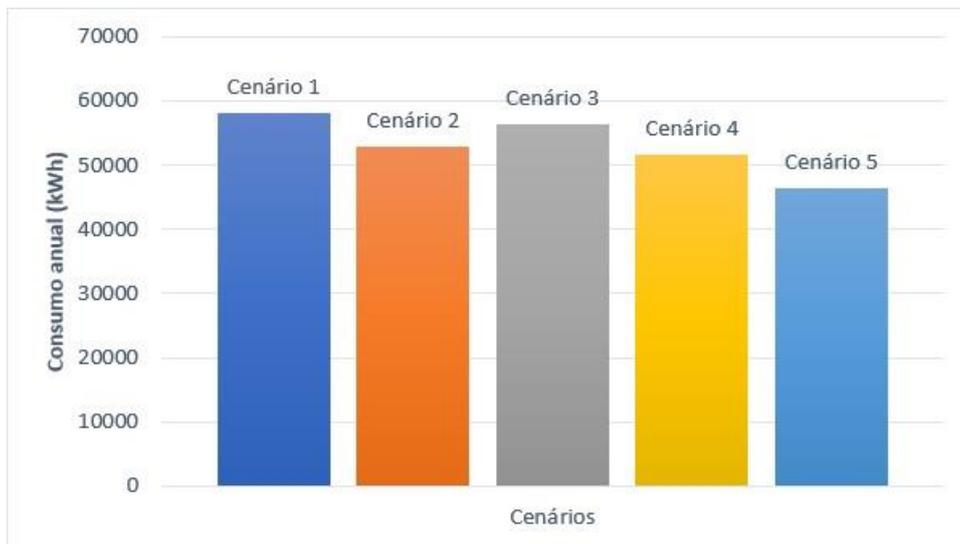


Figura 6.15 Consumo anual das soluções propostas

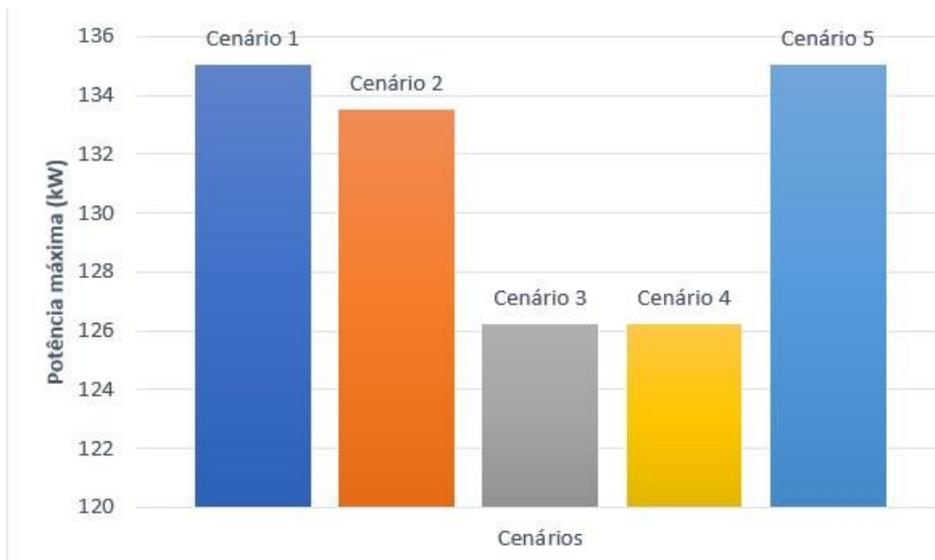


Figura 6.16 Carga térmica de pico das soluções propostas

Pelos resultados apresentados, é possível verificar que grande parcela da carga térmica do plenário é proveniente do ar de renovação, portanto, uma solução com dispositivo de controle de vazão de ar exterior é extremamente interessante para buscar uma maior eficiência energética. Juntamente a esse dispositivo, uma solução com free cooling também apresentou ótima economia de energia elétrica ao longo do ano, devido ao horário de ocupação do plenário que em algumas situações opera em condições climáticas externas favoráveis.

O dispositivo de recuperação de energia, entretanto, apresenta resultados favoráveis quanto à redução da capacidade de resfriamento do sistema de climatização, o que pode ser muito interessante, caso este esteja subdimensionado ou caso a carga térmica cresça e supere a capacidade instalada.

A Tabela 6.1 traz um resumo dos cenários avaliados com relação à carga térmica de pico e consumo de energia elétrica anual, juntamente com o valor correspondente à sua redução em relação ao cenário 1.

Tabela 6.1 Comparação de cenários

	Consumo anual de eletricidade (kWh)	Carga térmica de pico (kW)	Redução do consumo anual (%)	Redução carga térmica (%)
CENÁRIO 1	58.133	135	-	-
CENÁRIO 2	52.833	133,5	9,1	1,1
CENÁRIO 3	56.333	126,2	3,1	6,5
CENÁRIO 4	51.644	126,4	11,2	6,4
CENÁRIO 5	46.350	135	20,3	0

6.3 CONTROLE DA QUALIDADE DO AR INTERIOR POR CO₂

Alternativamente à solução de controle de vazão de ar exterior pelo número de ocupantes, foi proposta uma avaliação acerca do controle da taxa de ar de renovação através da concentração de dióxido de carbono no ambiente. Esta situação corresponde melhor com a realidade, onde é possível realizar um controle da taxa de ar exterior necessária através da concentração de CO₂, o que pode ser realizado facilmente com o auxílio de sensores e de controles.

O modelo adotado é de ventilação diluidora *Well Mixed Room Model* que consiste em estimar a concentração de CO₂ do ar exterior, a taxa de geração dos ocupantes e medir a diferença entre as concentrações internas e externas.

A equação 6.1 descreve o cálculo da concentração atingida no ambiente em regime permanente.

$$C_{i,ss} = \frac{(Q_{inf} * C_o + G)}{Q_{exf}}, \quad (6.1)$$

$C_{i,ss}$ é a concentração em regime permanente [ppm];

Q_{inf} é a vazão de ar de infiltração [L/s];

C_o é a concentração do ar externo [ppm];

G é a taxa de geração interna [L/s];

Q_{exf} é a vazão de ar de exfiltração [L/s];

O modelo de interesse é aquele que regula a conservação da concentração, ou seja, a taxa de ar de renovação é dependente da relação entre as diferenças de concentração de dióxido de carbono do ar interno e do ar externo, essa diferença não deve ser superior a 700 ppm, como relata o Anexo C da norma ABNT NBR 16401-3/2008.

Neste caso, a equação que define a conservação da concentração é dada da seguinte forma:

$$C_i(t) = \left(C_{io} - \frac{b}{a} \right) * e^{-at} + \frac{b}{a}, \quad (6.2)$$

Onde,

$$b = \frac{[Q_{inf} * C_o + Q_s * (1 - \varepsilon_f) * A_o * C_o + G]}{V}, \quad (6.3)$$

$$a = \frac{[Q_{exf} - (1 - \varepsilon_f) A_r * Q_s + Q_s - Q_m * G]}{V}, \quad (6.4)$$

$C_i(t)$ é a concentração em determinado instante [ppm];

C_{io} é a condição inicial do ambiente [ppm];

Q_s é a vazão de ar exterior [L/s];

ε_f é a eficiência de filtragem do contaminante;

A_o é a razão entre a vazão de ar exterior e ar de ventilação;

V é o volume do ambiente [L];

A_r é a razão entre a vazão de retorno e ar de ventilação;

Q_m é o diferencial da vazão de pressurização;

As principais características que foram consideradas para a definição do ambiente, bem como para o cálculo das concentrações de dióxido de carbono e das vazões de ar exterior estão dispostos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Características do ambiente escolhido

Parâmetro	Valor
Volume	11744 m ³
Concentração inicial de CO ₂	400 ppm
Concentração de CO ₂ do ar externo	400 ppm
Geração de CO ₂ por pessoa	0,0053 L/s
Vazão de infiltração	1 L/s.m ²
Eficiência de filtragem	0%
Concentração limite de CO ₂	1100 ppm

O período analisado foi de um dia típico de operação em condições iguais para as duas soluções avaliadas, como ilustrado na Figura 6.17.

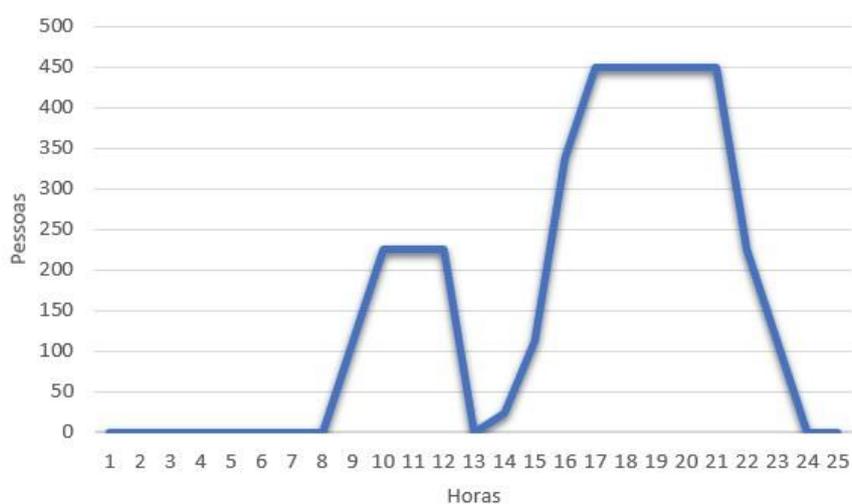


Figura 6.17 Perfil ocupacional dia típico

A primeira solução consiste na taxa de ar de renovação de acordo com o número de ocupantes, utilizando a metodologia da norma ABNT NBR 16401-3/2008 para a identificação da vazão eficaz, da mesma forma que foi realizada no cenário 2 estudado.

A segunda solução consiste na utilização do dispositivo de ar de renovação apenas quando a concentração de CO₂ atingisse o valor máximo estipulado, regulando assim a qualidade do ar interior da melhor forma.

A comparação entre essas duas análises é ilustrada na Figura 6.18 que representa as concentrações de CO₂ ao longo de um dia. A figura 6.19 apresenta os dados referentes à quantidade de ar externo necessário em cada solução para um dia de operação.

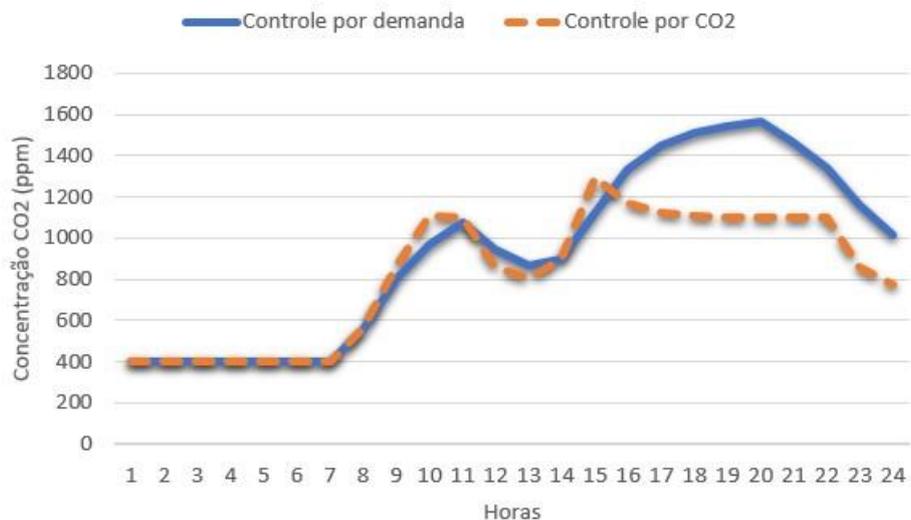


Figura 6.18 Concentração CO₂ dia típico

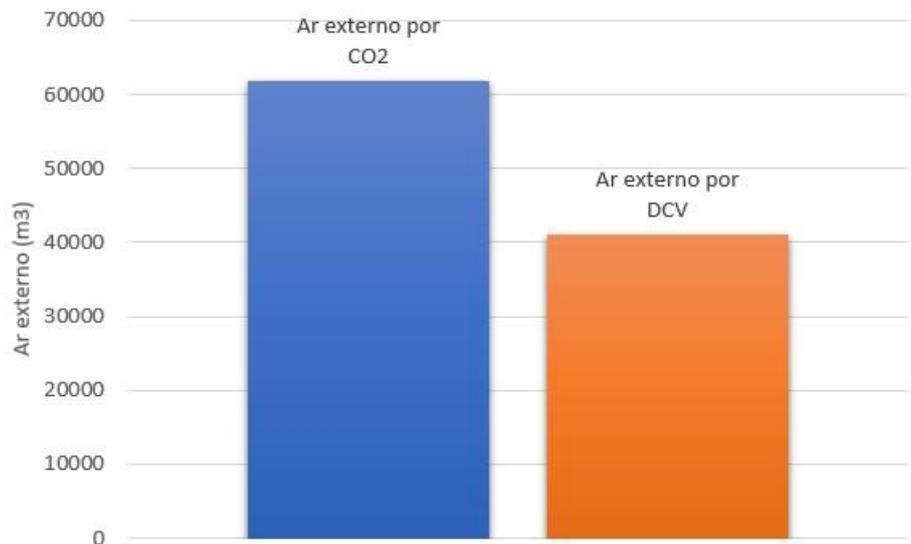


Figura 6.19 Ar externo necessário dia típico

Nota-se, portanto, um maior controle da qualidade do ar interior com a utilização de sensores e controles para acionamento do dispositivo de ar de renovação. A metodologia de controle de vazão de ar exterior por ocupante demonstrou incapacidade de manter o ambiente dentro do limite de concentração de CO₂ aceitável (1100 ppm). Em contrapartida, esta melhor qualidade do ar interior

proporcionada pela metodologia de controle por CO₂ induz uma maior utilização de ar exterior, o que consequentemente implica em mais carga térmica sendo inserida no ambiente.

Avaliando os resultados de ar externo necessário para o dia típico avaliado em cada situação, constatou-se que são utilizados aproximadamente 61.907 m³ quando o controle é feito através da concentração de CO₂ e de aproximadamente 40.998 m³ quando o ar externo inserido é de acordo com a ocupação. Para que seja possível obter uma melhor qualidade do ar interior é necessário 50,99% a mais de ar de renovação.

Ao realizar uma nova análise considerando a solução de variação da taxa de ar de renovação de acordo com o número de ocupantes e a solução que consiste na utilização do dispositivo de ar de renovação apenas quando a concentração de CO₂ atingisse o valor máximo estipulado, para uma semana típica, representada pela Figura 5.8 **Perfil de ocupação semanal**, podemos ter uma melhor avaliação quanto a magnitude dessa diferença entre as soluções.

A comparação entre essa segunda análise é ilustrada na Figura 6.20 que representa as concentrações de CO₂ ao longo da semana.

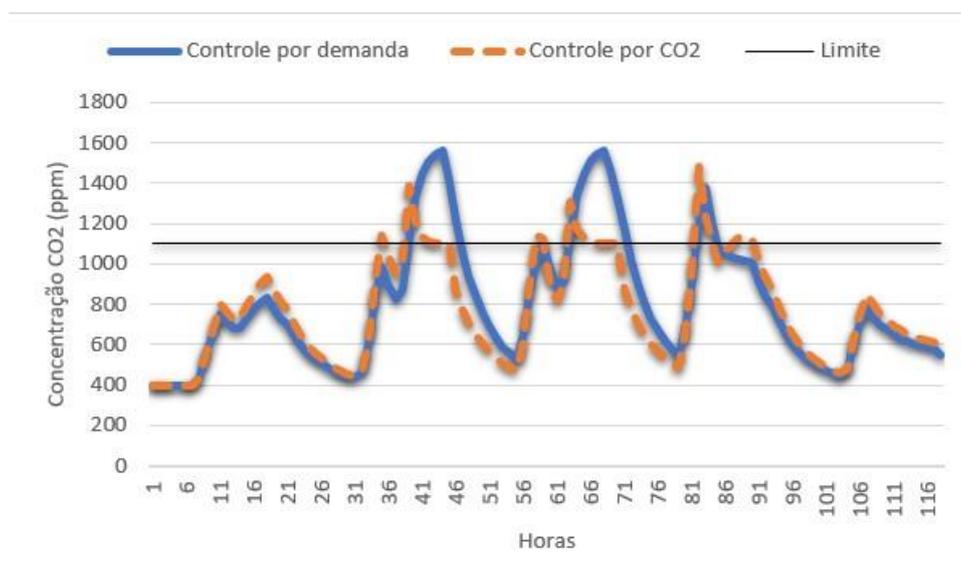


Figura 6.20 Concentração CO₂ para uma semana

Percebe-se, portanto, nesta avaliação que a diferença entre a concentração do contaminante nos dois cenários avaliados só apresenta diferença significativa em momentos de ocupação máxima, instantes estes onde a vazão de ar externo por ocupante se demonstra incapaz de manter a concentração limite estabelecida. Reafirma-se assim que a solução de controle por CO₂ apresenta uma melhor qualidade do ar interior.

Ressalta-se que a avaliação realizada propôs analisar a concentração de CO₂ de hora em hora ao longo de um dia ou semana. Portanto, a resposta do sistema não é imediata, o que justifica valores instantâneos acima do limite estipulado. Isto em um sistema real funciona no formato de resposta dinâmica, sendo assim, a concentração será preservada.

Avaliando os resultados de ar externo necessário para a semana avaliada em cada situação, constatou-se que são utilizados aproximadamente 125.031 m³ quando o controle é feito através da concentração de CO₂ e de aproximadamente 113.406 m³ quando o ar externo inserido é de acordo com a ocupação. Comparando esses valores, nota-se que a solução de controle por CO₂ apresenta a necessidade de aproximadamente 10% a mais de ar de renovação.

7 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal a apresentação e comparação de possíveis soluções de operação para eficiência energética em sistemas de ar condicionado operando com tecnologias de controle de vazão de ar exterior, de recuperação de energia e free cooling, além de apresentar uma metodologia para análise da qualidade do ar interior. Através de uma simulação computacional, foi possível identificar o desempenho dessas tecnologias em função da variação de parâmetros como os perfis ocupacionais.

O relatório tem, em sua primeira parte, uma extensa revisão bibliográfica e conceitual, que traz um embasamento teórico dos dispositivos de vazão de ar exterior variável e recuperação de energia, bem como uma base acerca do controle da qualidade do ar interior, definindo desde conceitos básicos de termodinâmica até o funcionamento de cada equipamento.

A metodologia apresentada contou com a utilização de simulações computacionais para caracterização do sistema de climatização em estudo. Com isso foi possível analisar a viabilidade de aplicação das tecnologias em questão em cada cenário proposto. Paralelamente às condições térmicas, uma análise a respeito da qualidade do ar interior em diferentes condições de operação também foi avaliada.

A partir dos resultados, pode-se perceber que a carga térmica do ambiente em estudo é bem estabelecida, desta forma a contribuição deste trabalho tem como foco a redução da carga térmica adicional proveniente do ar de renovação juntamente com a utilização desse mesmo ar quando for conveniente.

- A utilização de dispositivo de vazão de ar exterior variável apresentou ótima redução no consumo de energia elétrica anual;
- O cenário 2, proporcionou redução no consumo de energia elétrica anual de aproximadamente 9,1%;
- O dispositivo de vazão de ar exterior variável não apresentou reduções significativas em relação à carga térmica de pico, cerca de 1%, não proporcionando grandes vantagens econômicas no dimensionamento dos equipamentos de climatização;
- A utilização de dispositivo de recuperação de energia apresentou reduções consideráveis na carga térmica de pico do sistema, muito interessante na seleção de equipamentos;
- O cenário 3 proporcionou redução percentual de aproximadamente 6,5% na carga térmica de pico e de 3,1% no consumo de energia elétrica anual;

- A combinação das duas técnicas apresentou vantagens em relação à carga térmica de pico e também ao consumo de energia elétrica anual;
- O cenário 4 proporcionou redução percentual de aproximadamente 6,4% na carga térmica de pico. Com relação ao consumo energético anual, foi alcançada uma redução percentual de aproximadamente 11,2%;
- O cenário 5 apresentou a melhor redução de energia elétrica anual dentre todos os cenários, proporcionou aproximadamente 20,2% de economia, grande parte da economia proporcionada pela tecnologia de free cooling analisada;
- A combinação de controle de vazão de exterior variável paralelamente com water-side economizer e air-side economizer não proporcionou vantagens com relação à carga térmica de pico.

Notou-se também que as condições climáticas em que o ambiente está inserido afetam fortemente os resultados encontrados, sobretudo o dispositivo recuperador de energia e os economizadores. Para a cidade de Brasília, foi possível perceber que durante certos meses do ano, as utilizações desses dispositivos não proporcionam boas economias.

Analisando os resultados relacionados ao ar externo de renovação avaliados em cada situação, percebeu-se que o ar externo de renovação proposto pela metodologia da norma ABNT NBR 16401-3/2008 e o ar externo para controlar a concentração de CO₂ no Anexo C da norma apresentam valores divergentes.

- A metodologia de controle de vazão de ar exterior por ocupante de nível 1 para a atividade de plenário, demonstrou incapacidade de manter o ambiente dentro do limite de concentração de CO₂ aceitável (1100 ppm) em momentos de grande ocupação;
- A utilização de sensores e controles para acionamento do dispositivo de ar de renovação a partir da concentração de CO₂ apresentou maior controle da qualidade do ar interior;
- A solução de controle por concentração de CO₂ para um dia de elevada ocupação utiliza aproximadamente 51% a mais de ar de renovação;
- Realizando a mesma comparação de cenários, para uma semana, percebe-se a necessidade de utilização de mais ar de renovação para controle por concentração de CO₂ de 10%;
- A metodologia de controle de vazão de ar exterior por ocupante apresenta menor necessidade de ar de renovação, desta forma, maior economia de energia elétrica, porém sem condições de manter a qualidade do ar interior dentro dos limites estabelecidos pela e ABNT NBR 16401;

Finalmente, é concluído que as estratégias de eficiência energética apresentadas possuem grande potencial econômico em sistemas de climatização e que parâmetros climáticos podem

aumentar ainda mais as reduções exibidas. Com relação à qualidade do ar interior, para que o ambiente esteja em boas condições de operação, será necessária a inserção de mais carga térmica atrelada ao ar externo inserido no ambiente, aumentando o consumo de energia. Para o estudo de caso realizado, percebemos que o potencial de economia de energia elétrica anual com o controle de vazão de ar exterior e free cooling são muito significativos, incentivando suas implementações.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos estudos, sugere-se, aprimorar ainda mais a simulação computacional, de modo a buscar o menor erro em função das diversas variações paramétricas, com o intuito de aprimorar a precisão dos resultados, além de realizar uma análise financeira apontando quais cenários apresentariam maiores economias bem como a sua viabilidade de instalação e utilização.

Espera-se análises das tecnologias avaliadas em diversos estudos de casos no Brasil, explorando os diferentes aspectos climáticos presentes no país e seus benefícios para as presentes soluções estudadas.

Avaliar os impactos econômicos de energia das soluções apresentadas em diferentes dispositivos de climatização em diferentes tipos de edifícios de ocupação variável.

Ademais, espera-se que seja capaz a instalação e utilização das tecnologias de recuperação de energia, de vazão de ar exterior variável e free cooling no plenário, a fim de validar a solução teórica com dados experimentais, bem como realizar um controle e qualidade do ar associado à utilização desses dispositivos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. PERSILY; L. DE JONGE Carbon dioxide generation rates for building occupants, 2016.
- ABE, O.O.; SIMONSON, C.J.; BESANT, R.W.; SHANG, W.; Effectiveness of energy wheels from transient measurements. Part I. Prediction of effectiveness and uncertainty, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 49, 2006.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações, parte 1: Definições, símbolos e unidades. 2005a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-1: Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários, parte 1: projeto de instalações. 2008a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-2: Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários, parte 2: parâmetros de conforto técnico. 2008b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-2: Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários, parte 3: qualidade do ar interior. 2008c.
- ANEEL, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.
- ASHRAE Standard 189.1-2009, Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2009.
- AWBI, HAZIM B. Ventilation for good indoor air quality and energy efficiency, 2017.
- BRANCO, NATASHE NICOLI. Avaliação de índices de consumo de energia para supermercados, 2010.
- BRASIL. Congresso Nacional. Câmara dos Deputados. Plantas Arquitetônicas do Plenário Ulysses Guimarães. Coordenação de Projetos de Arquitetura, 2017.
- COSTA, CRISTINA MARIA PONTE. Estudo da Qualidade do Ar Interior num edifício departamental da UC, 2011.
- DHITAL, P., BESANT, R.W., AND SCHOENAU, G.J. Integrating run-around heat exchanger systems into the design of large office buildings. United States: N. p., 1995.
- FRANS DENNY; ERIC PERMANA; JASON SCOTT; JING WANG; DAVID Y. H. PUI; AND ROSE AMAL. Integrated Photocatalytic Filtration Array for Indoor Air Quality Control, 2010.
- GABEL, S.D.; JANSSEN, J.E.; CHRISTOFELL S.E. Carbon Dioxide-Based Ventilation Control System Demonstration. U. S. Department of Energy, 1986.

ILIE, ANICA. Study on technical and economical solutions for improving airconditioning efficiency in building sector, 2017.

INKLAB, NONTIVAT. Performance Assessment of Dedicated Outdoor air Systems for Office Building in Thailand, 2015.

JOHNSON, A.B., C.J. SIMONSON, and R.W. BESANT. Uncertainty analysis in the testing of air-to-air heat/energy exchangers installed in buildings. ASHRAE Transactions 104(1B):1639-1650. 1998.

JOHNSON, A.B.; BESANT, R.W.; SCHOENAU, G.J. Design of multi-coil run-around heat exchanger systems for ventilation air heating and cooling. ASHRAE Transactions 101(2): 967-978, 1995.

JUNLONG ZHANG; ALAN S. FUNG. Experimental study and analysis of an energy recovery ventilator and the impacts of defrost cycle, 2015.

L.Z. ZHANG; J.L. NIU. Energy requirements for conditioning fresh air and the longterm savings with a membrane-based energy recovery ventilator in Hong Kong, 2001.

LAURA MARIA TARRAFA PEREIRA DA SILVA. Avaliação do conforto térmico e da qualidade do ar interior nos edifícios A e B do Instituto Pedro Nunes, 2015.

LIA CHATZIDIAKOU; DEJAN MUMOVIC; ALEX SUMMERFIELD. Is CO2 a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO2 levels, ventilation rates and selected indoor pollutants, 2015.

LIA CHATZIDIAKOU; DEJAN MUMOVIC; ALEX SUMMERFIELD. Is CO2 a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 2: Health outcomes and perceived indoor air quality in relation to classroom exposure and building characteristics, 2015.

LIM, YOUNG-HOON. Indoor Environment Control and Energy Saving Performance of \hat{G} Hybrid Ventilation System for a Multi-residential Building, 2015.

LINGLING BAO; JINGGANG WANG; HONGXING YANG. Investigation on the performance of a heat recovery ventilator in different climate regions in China, 2016.

LIU, J.; LI, W.; LIU, J.; WANG, B. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment, Energy and Buildings 42, 2010.

LUIS PEREZ-LOMBARD; JOSE ORTIZ; ISMAEL R. MAESTRE. The map of energy flow in HVAC systems, 2011.

MANSANO, RICARDO MARCEL. A iluminação do plenário da Câmara dos Deputados e sua relevância para a qualidade das imagens televisivas, 2012.

MOHAMMAD RASOULI; GAOMING GE; CAREY J. SIMONSON; ROBERT W. BESANT. Uncertainties in energy and economic performance of HVAC systems and energy recovery ventilators due to uncertainties in building and HVAC parameters, 2013.

NASIF, M.S.; MORRISON, G.L.; BEHNIA, M. Heat and mass transfer in air to air enthalpy heat exchangers. Proceedings of the 6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Matsushima, Japan, 2005.

PEREIRA, NORBERTO JANUÁRIO. Estudos de concentração de co2 em ambientes climatizados e meios de controles, 2007.

PEREZ-LOMBARD, L.; et al. A review on buildings energy consumption information, Energy and Buildings 40, 2008.

PIMENTA, J. Ar Condicionado: Cálculo de Carga Térmica. Notas de Aula. 2009.

PIMENTA, J. Ar Condicionado: Ar de renovação. Notas de Aula. 2016.

PROCEL, Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações. Ministério de Minas e Energia, 2009.

PRUDENTE. Estudo de viabilidade dos sistemas de renovação de ar variável e recuperação de energia em unidades de ar condicionado, 2017.

REMELI, M.F. Passive Heat Recovery System using Combination of Heat Pipe and Thermoelectric Generator.

RASOULI, M.; SIMONSON, C.; BESANT, R. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions, Energy and Buildings 42, 2010.

ROTH, K.W.; DIECKMANN, J.; BRODRICK, J. Demand Control Ventilation. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Newsletter, 2003.

TRANE ENGINEERS NEWSLETTER VOLUME 34–5. CO2-Based Demand-Controlled Ventilation with ASHRAE Standard 62.1-2004, 2005.

ULAR PALMISTE and HENDRIK VOLL. Free cooling potential of an airside economizer in Estonia, 2016.

VALVERDE. Modelagem e simulação do impacto da vazão de ar exterior variável e recuperação de energia sobre o desempenho de sistemas de ar condicionado, 2016.

WEI YE; XU ZHANG; JUN GAO; GUANGYU CAO; XIANG ZHOU; XING SU. Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: A literature review, 2017.

WEIWEI WU; ZHAOSONG FANG; WENHUI JI; HOUHUA WANG. Optimal operation condition division with profit and losses analysis of energy recovery ventilator, 2016.

WILLIAM KOPKO and CHRISTIAN RUDIO. Free Cooling: An Intelligent Solution for Year-Round Cooling, 2017.

XIAO LI; YAOYU LI; JOHN E. SEEM; PENGFEI LI Extremum Seeking Control of Cooling Tower for Self-Optimizing Efficient Operation of Chilled Water Systems, 2012.

Y.P. ZHOU; J.Y. WU; R.Z. WANG. Performance of energy recovery ventilator with various weathers and temperature set-points, 2007.

YANG, PENG. Testing for Energy Recovery Ventilators and Energy Saving Analysis with Air-Conditioning Systems, 2015.

YANMING KANG; YOUJUN WANG; KE ZHONG; JIAPING LIU. Temperature ranges of the application of air-to-air heat recovery ventilator in supermarkets in winter, China, 2010.

YUNQING FAN; KEIJI KAMEISHI; SHIGEKI ONISHI; KAZUHIDE ITO. Field-based study on the energy-saving effects of CO₂ demand controlled ventilation in an office with application of Energy recovery ventilators, 2014.

APÊNDICES

A.1 Relatório de cálculo EnergyPlus

Report: **Input Verification and Results Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2017-11-04 19:04:21 General**

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.7.0-78a111df4a, YMD=2017.11.04 19:03
RunPeriod	RUN PERIOD 1
Weather File	Brasilia DF BRA INMET WMO#=867150
Latitude [deg]	-15.8
Longitude [deg]	-47.9
Elevation [m]	1160.00
Time Zone	-3.0
North Axis Angle [deg]	-0.00
Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

Site:Location

	Location Name	Latitude {N+/S-Deg}	Longitude {E+/W-Deg}	Time Zone Number {GMT +/-}	Elevation {m}	Standard Pressure at Elevation {Pa}	Standard RhoAir at Elevation
1	Brasilia DF BRA INMET WMO#=867150	-15.78	-47.93	-3.00	1160.00	88144	1.0476

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613
Steam	0.300
Gasoline	1.050
Diesel	1.050
Coal	1.050
Fuel Oil #1	1.050
Fuel Oil #2	1.050
Propane	1.050
Other Fuel 1	1.000
Other Fuel 2	1.000

Report: **Climatic Data Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2017-11-04 19:04:21 SizingPeriod:DesignDay**

	Maximum Dry Bulb [C]	Daily Temperature Range [deltaC]	Humidity Value	Humidity Type	Wind Speed [m/s]	Wind Direction
BRASILIA AEROPORTO APRIL .4% CONDNS DB=>MCWB	30.80	10.70	20.10	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO AUGUST .4% CONDNS DB=>MCWB	31.90	14.60	16.60	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO DECEMBER .4% CONDNS DB=>MCWB	31.20	8.70	19.50	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO FEBRUARY .4% CONDNS DB=>MCWB	31.80	9.80	20.00	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO JANUARY .4% CONDNS DB=>MCWB	31.90	9.50	19.50	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO JULY .4% CONDNS DB=>MCWB	29.20	14.50	16.00	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO JUNE .4% CONDNS DB=>MCWB	28.90	13.90	16.70	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO MARCH .4% CONDNS DB=>MCWB	31.10	9.70	19.50	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO MAY .4% CONDNS DB=>MCWB	30.10	12.30	18.60	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO NOVEMBER .4% CONDNS DB=>MCWB	32.30	9.50	18.50	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO OCTOBER .4% CONDNS DB=>MCWB	33.50	11.40	17.70	Wetbulb [C]	3.40	60.00
BRASILIA AEROPORTO SEPTEMBER .4% CONDNS DB=>MCWB	33.20	13.20	16.60	Wetbulb [C]	3.40	60.00

Central Plant

	Type	Nominal Capacity [W]	Nominal Efficiency [W/W]	IPLV in SI Units [W/W]	IPLV in IP Units [Btu/W-h]
CHILLER ELECTRIC EIR 1	Chiller:Electric:EIR	337557.95	5.50	6.11	20.85
COOLING TOWER SINGLE SPEED 1	CoolingTower:SingleSpeed	319145.70			

Fans

	Type	Total Efficiency [W/W]	Delta Pressure [pa]	Max Air Flow Rate [m3/s]	Rated Electric Power [W]	Rated Power Per Max Air Flow Rate [W-s/m3]	Motor Heat In Air Fraction	End Use
FAN VARIABLE VOLUME 1	Fan:VariableVolume	0.60	500.00	15.90	13149.59	827.13	1.00	General

Pumps

	Type	Control	Head [pa]	Water Flow [m3/s]	Electric Power [W]	Power Per Water Flow Rate [W-s/m3]	Motor Efficiency [W/W]
PUMP VARIABLE SPEED 2	Pump:VariableSpeed	Intermittent	179352.00	0.012057	3080.35	255487.18	0.90
PUMP VARIABLE SPEED 3	Pump:VariableSpeed	Intermittent	179352.00	0.017045	4354.72	255487.18	0.90

For: Entire Facility

Timestamp: 2018-06-09 21:40:29

Zone Sensible Cooling

	Calculated Design Load [W]	User Design Load [W]	User Design Load per Area [W/m ²]	Calculated Design Air Flow [m ³ /s]	User Design Air Flow [m ³ /s]	Design Day Name	Date/Time Of Peak (TIMESTAMP)	Thermostat Setpoint Temperature at Peak Load [C]	Indoor Temperature at Peak Load [C]	Indoor Humidity Ratio at Peak Load [kgWater/kgAir]	Outdoor Temperature at Peak Load [C]	Outdoor Humidity Ratio at Peak Load [kgWater/kgAir]	Minimum Outdoor Air Flow Rate [m ³ /s]	Heat Gain Rate from DOAS [W]
THERMAL ZONE 1	125793.84	125793.84	184.16	15.898	15.898	BRASILIA AEROPORTO OCTOBER -4% CONDENS DB=>MCWB	10/21 17:00:00	23.00	23.00	0.00905	31.90	0.00793	1.332	1222.22

System Design Air Flow Rates

	Calculated cooling [m ³ /s]	User cooling [m ³ /s]	Calculated heating [m ³ /s]	User heating [m ³ /s]	Adjusted cooling [m ³ /s]	Adjusted heating [m ³ /s]	Adjusted main [m ³ /s]	Calculated Heating Air Flow Ratio []	User Heating Air Flow Ratio []
VAV WITH REHEAT	15.90	15.90	1.33	1.33	15.8979	1.3320	15.8979	0.0838	0.3000

Demand Controlled Ventilation using Controller:MechanicalVentilation

	Controller:MechanicalVentilation Name	Outdoor Air Per Person [m ³ /s-person]	Outdoor Air Per Area [m ³ /s-m ²]	Outdoor Air Per Zone [m ³ /s]	Outdoor Air ACH [ach]	Outdoor Air Method	Outdoor Air Schedule Name	Air Distribution Effectiveness in Cooling Mode
THERMAL ZONE 1	CONTROLLER MECHANICAL VENTILATION 2	0.002960	0.000000	0.000000	0.000000	Maximum		1.00

Time Setpoint Not Met

	During Heating [hr]	During Cooling [hr]	During Occupied Heating [hr]	During Occupied Cooling [hr]
THERMAL ZONE 1	0.00	0.00	0.00	0.00
Facility	0.00	0.00	0.00	0.00

System Ventilation Requirements for Cooling

	Sum of Zone Primary Air Flow - Vpz-sum [m ³ /s]	System Population - Ps	Sum of Zone Population - Pz-sum	Occupant Diversity - D	Uncorrected Outdoor Air Intake Airflow - Vou [m ³ /s]	System Primary Airflow - Vps [m ³ /s]	Average Outdoor Air Fraction - Xs	System Ventilation Efficiency - Ev	Outdoor Air Intake Flow - Vot [m ³ /s]	Percent Outdoor Air - %OA
VAV WITH REHEAT	15.8979	0.0000	450.0000	1.0000	1.3320	15.8979	0.0871	1.0000	1.3320	0.0838

Zone Ventilation Parameters

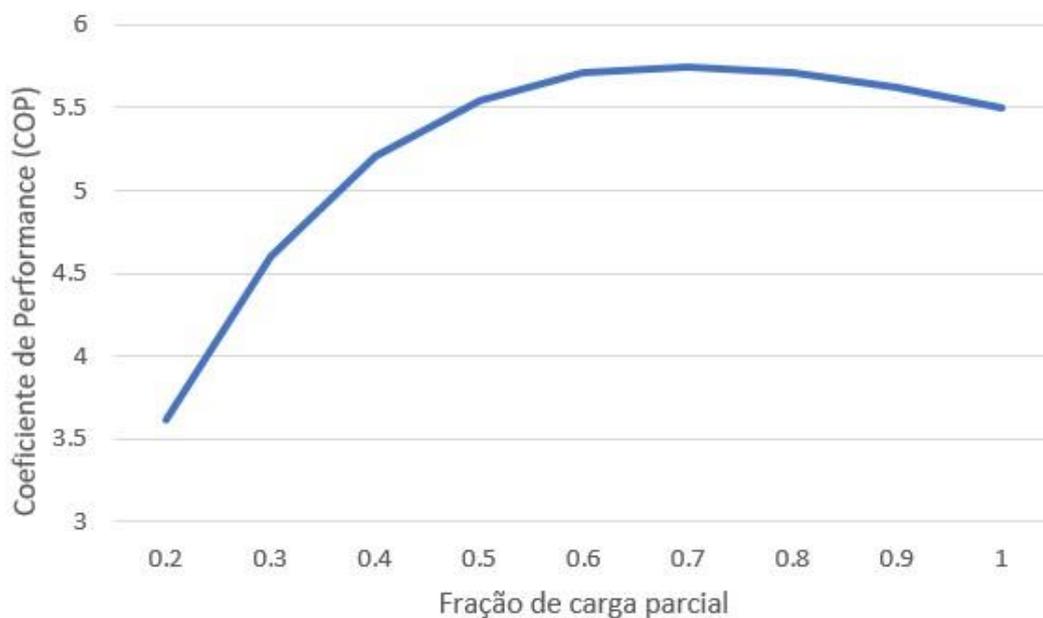
	AirLoop Name	People Outdoor Air Rate - Rp [m ³ /s-person]	Zone Population - Pz	Area Outdoor Air Rate - Ra [m ³ /s-m ²]	Zone Floor Area - Az [m ²]	Breathing Zone Outdoor Airflow - Vbz [m ³ /s]	Cooling Zone Air Distribution Effectiveness - Ez-clg	Cooling Zone Outdoor Airflow - Voz-clg [m ³ /s]
THERMAL ZONE 1	VAV WITH REHEAT	0.002960	450.0000	0.000000	683.06	1.3320	1.0000	1.3320

B.1 Especificações dispositivos na Simulação (ERV)

OS:HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent	
Name	ERV HX
Nominal Supply Air Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized <input type="text"/> Autosize
Sensible Effectiveness at 100% Heating Air Flow	<input type="text" value="0.76"/>
Latent Effectiveness at 100% Heating Air Flow	<input type="text" value="0.68"/>
Sensible Effectiveness at 75% Heating Air Flow	<input type="text" value="0.81"/>
Latent Effectiveness at 75% Heating Air Flow	<input type="text" value="0.73"/>
Sensible Effectiveness at 100% Cooling Air Flow	<input type="text" value="0.76"/>
Latent Effectiveness at 100% Cooling Air Flow	<input type="text" value="0.68"/>
Sensible Effectiveness at 75% Cooling Air Flow	<input type="text" value="0.81"/>
Sensible Effectiveness at 75% Cooling Air Flow	<input type="text" value="0.81"/>
Latent Effectiveness at 75% Cooling Air Flow	<input type="text" value="0.73"/>
Nominal Electric Power	<input type="text" value="2000"/> W
Supply Air Outlet Temperature Control	<input type="text" value="No"/>
Heat Exchanger Type	<input type="text" value="Plate"/>
Frost Control Type	<input type="text" value="None"/>
Threshold Temperature	<input type="text" value="1.7"/> C
Initial Defrost Time Fraction	<input type="text"/>
Rate of Defrost Time Fraction Increase	<input type="text"/> 1/K
Economizer Lockout	<input type="text" value="Yes"/>

B.2 Especificações dispositivos na Simulação (Chiller)

OS:Chiller:Electric:EIR	
Name	Chiller Electric EIR 1
Reference Capacity	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> W <input checked="" type="radio"/> Autosized <input type="button" value="Autosize"/>
Reference COP	<input type="text" value="5.5"/>
Reference Leaving Chilled Water Temperature	<input type="text" value="6.67"/> C
Reference Entering Condenser Fluid Temperature	<input type="text" value="29.4"/> C
Reference Chilled Water Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized <input type="button" value="Autosize"/>
Reference Condenser Fluid Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized <input type="button" value="Autosize"/>
Minimum Part Load Ratio	<input type="text" value="0.1"/>
Maximum Part Load Ratio	<input type="text" value="1.0"/>
Optimum Part Load Ratio	<input type="text" value="1.0"/>
Minimum Unloading Ratio	<input type="text" value="0.2"/>
Condenser Fan Power Ratio	<input type="text" value="0.0"/>
Compressor Motor Efficiency	<input type="text" value="1.0"/>
Leaving Chilled Water Lower Temperature Limit	<input type="text" value="2.0"/> C
Chiller Flow Mode	<input type="text" value="NotModulated"/>
Sizing Factor	<input type="text" value="1"/>



OS:Curve:Biquadratic	
Name	Curve Biquadratic 19
Coefficient1 Constant	0.258
Coefficient2 x	0.0389
Coefficient3 x**2	-0.000217
Coefficient4 y	0.0469
Coefficient5 y**2	-0.000943
Coefficient6 x*y	-0.000343
Minimum Value of x	5
Maximum Value of x	10
Minimum Value of y	24
Maximum Value of y	35

OS:Curve:Biquadratic	
Name	Curve Biquadratic 20
Coefficient1 Constant	0.934
Coefficient2 x	-0.0582
Coefficient3 x**2	0.0045
Coefficient4 y	0.00243
Coefficient5 y**2	0.000486
Coefficient6 x*y	-0.00122
Minimum Value of x	5
Maximum Value of x	10
Minimum Value of y	24
Maximum Value of y	35

OS:Curve:Quadratic	
Name	Curve Quadratic 16
Coefficient1 Constant	0.222903
Coefficient2 x	0.313387
Coefficient3 x**2	0.46371
Minimum Value of x	0
Maximum Value of x	1

B.3 Especificações dispositivos na Simulação (Torre de resfriamento)

OS: CoolingTower:SingleSpeed	
Name	Cooling Tower Single Speed 1
Design Water Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Design Air Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Fan Power at Design Air Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> W <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
U-Factor Times Area Value at Design Air Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> W/K <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Air Flow Rate in Free Convection Regime	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
U-Factor Times Area Value at Free Convection Air Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> W/K <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Performance Input Method	UFactorTimesAreaAndDesignWaterFlowRate
Nominal Capacity	<input type="text"/> W
Free Convection Capacity	0 <input type="text"/> W
Basin Heater Capacity	0 <input type="text"/> W/K
Basin Heater Setpoint Temperature	2.0 <input type="text"/> C
Basin Heater Operating Schedule Name	<input type="text"/>
Evaporation Loss Mode	LossFactor
Evaporation Loss Factor	0.2 <input type="text"/> percent/K
Drift Loss Percent	0.008 <input type="text"/> percent
Blowdown Calculation Mode	ConcentrationRatio

Blowdown Concentration Ratio

Blowdown Makeup Water Usage Schedule Name

Capacity Control

Number of Cells

Cell Control

Cell Minimum Water Flow Rate Fraction

Cell Maximum Water Flow Rate Fraction

Sizing Factor

Free Convection Air Flow Rate Sizing Factor

Free Convection U-Factor Times Area Value Sizing Factor

Heat Rejection Capacity and Nominal Capacity Sizing Ratio

Free Convection Nominal Capacity Sizing Factor

Design Inlet Air Dry-Bulb Temperature
 C

Design Inlet Air Wet-Bulb Temperature
 C

Design Approach Temperature
 Hard Sized K
 Autosized

Design Range Temperature
 Hard Sized K
 Autosized

End-Use Subcategory

B.4 Especificações dispositivos na Simulação (Ventilador)

OS:Fan:VariableVolume	
Name	Fan Variable Volume 1
Availability Schedule Name	Always On Discrete
Fan Efficiency	0.6045
Pressure Rise	500 Pa
Maximum Flow Rate	<input type="radio"/> Hard Sized <input type="text"/> m ³ /s <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Fan Power Minimum Flow Rate Input Method	FixedFlowRate
Fan Power Minimum Flow Fraction	0
Fan Power Minimum Air Flow Rate	0 m ³ /s
Motor Efficiency	0.93
Motor In Airstream Fraction	1
Fan Power Coefficient 1	0.040759894
Fan Power Coefficient 2	0.08804497
Fan Power Coefficient 3	-0.07292612
Fan Power Coefficient 4	0.943739823
Fan Power Coefficient 5	0