

LUCAS GUEDES DOS REIS

Conforto térmico de edificações: Análise crítica das tecnologias existentes.

Guaratinguetá

2015

LUCAS GUEDES DOS REIS

Conforto térmico de edificações: Análise crítica das tecnologias existentes.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Antônio Perrella Balestieri

Guaratinguetá

2015

R375c

Reis, Lucas Guedes dos

Conforto térmico de edificações: análise crítica das tecnologias existentes./ Lucas Guedes dos Reis – Guaratinguetá, 2015.

74 f. : il.

Bibliografia : f. 72-74

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

1. Conforto térmico 2. Edifícios sustentáveis 3. Edifícios - Propriedades térmicas 4. Edifícios – Ventilação I. Título

CDU 699.86


LUCAS GUEDES DOS REIS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Rubens Alves Dias
UNESP-FEG


Prof. Mateus Dias Ribeiro
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

LUCAS GUEDES DOS REIS

| | |
|-------------------|--|
| NASCIMENTO | 26.09.1985 – LORENA / SP |
| FILIAÇÃO | Edem Elias dos Reis Rosânia Guedes dos Reis |
| 2009/2015 | Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista |
| 2013/2014 | Graduação Sanduíche <i>Mechanical Engineering – University of Glasgow- Scotland</i> |

dedico este trabalho a minha querida família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de tudo agradeço ao meu Deus. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri* que sempre esteve disponível a me ajudar e principalmente pelos conselhos transmitidos em nossas conversas

aos meus pais *Edem e Rosânia* que, cada um a seu modo, sempre estiveram ao meu lado me incentivando a seguir em frente e perseguir os meus sonhos e objetivos

aos meus avós *Jamil e Althair*

aos meus amigos de curso, que sempre estiveram dispostos a ajudar e compartilhar seus conhecimentos

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, em especial na figura dos professores que, em sua maioria, sempre me atenderam com presteza e atenção, transmitindo seus ensinamentos para que eu me torna-se um profissional qualificado

à Liebherr Aerospace Brasil, pela oportunidade e confiança depositadas em mim para a realização de parte deste trabalho.

“Aprenda como se você fosse viver para sempre. Viva como se você fosse morrer amanhã.”

Mahatma Gandhi

REIS, L. G. **Conforto térmico em edificações: análise crítica das tecnologias existentes.** 2015. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

O aumento da emissão dos gases estufa, como consequência da expansão industrial em especial dos países em desenvolvimento, é apontada como um dos responsáveis pelo aquecimento global. Altas temperaturas em edificações são apontadas como fator responsável pela queda de produtividade no trabalho e alto nível de desconforto. Com o aumento da demanda de energia mundial, devido ao crescimento populacional, este trabalho visa servir de texto introdutório revisando as atuais tecnologias de ventilação (mecânica e natural) e refrigeração, além de apresentar técnicas para resfriamento utilizando baixo consumo de energia e alternativas arquitetônicas que visam oferecer boa ventilação e temperaturas ideais às edificações, tornando-as sustentáveis. Abordam-se ainda instrumentos necessários para a avaliação dos parâmetros que definem conforto térmico a fim de que se possam atingir os níveis mínimos definidos por normas internacionais e nacionais. Por fim, aborda-se um estudo de caso com a aplicação de conceitos e a utilização de tecnologias no texto descrito apresentando-se ao final os resultados alcançados, quais foram as limitações e sugestões para futuros trabalhos.

PALAVRAS-CHAVE: Energia. Ventilação. Refrigeração. Edificação sustentável.

REIS, L. G. **Thermal comfort in buildings: critical analysis of current technologies**. 2015. 74 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The rising in greenhouse gases emission as consequence of industrial expansion especially in developing countries is appointed as one of those reasons responsible for global warming. High-level temperatures are set as responsible for low productivity and high levels of discomfort. With the increase of worldwide energy demand, due to the population growth, this work aims to be an introductory text revising the current ventilation (mechanical and natural) and refrigeration technologies as well as low energy cooling techniques and architectural alternatives that seeks offering good ventilation and ideal buildings temperatures, making them sustainable. In addition, the text deals with the measurement instruments used to evaluate the parameters defined by international and national standards. At last, a case of study applies few concepts and technologies described in the text, introducing the results achieved, the limitations and suggestions to future works.

KEYWORDS: Energy. Ventilation. Refrigeration. Sustainable building.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Unidade de exaustão local | 22 |
| Figura 2 – Classificação da ventilação geral | 24 |
| Figura 3 - Ventilação natural devido à força dos ventos e efeito chaminé..... | 27 |
| Figura 4 - (a) Ventilação de lado simples; Ventilação cruzada (b) | 28 |
| Figura 5 - Casos típicos de ventilação natural em galpões..... | 28 |
| Figura 6 - Localização dos ventiladores segundo a ACGIH | 31 |
| Figura 7 - Sistema misto de ventilação..... | 32 |
| Figura 8 - Ciclo básico por compressão de vapor | 36 |
| Figura 9 - Resfriamento evaporativo direto..... | 38 |
| Figura 10 - Resfriamento evaporativo direto – carta psicométrica | 38 |
| Figura 11 - Resfriamento evaporativo indireto..... | 39 |
| Figura 12 - Aplicação dos tubos resfriadores subterrâneos..... | 42 |
| Figura 13 - Esquema de operação de um EAHE no SD Worx..... | 42 |
| Figura 14 - Esquema de operação da ventilação natural noturna no SD Worx..... | 43 |
| Figura 15 – Classificação das tecnologias de resfriamento solar | 44 |
| Figura 16 - Ciclo de refrigeração utilizando material sólido dissecante | 45 |
| Figura 17 - Esquema de ciclo de absorção de simples estágio | 45 |
| Figura 18 – Exemplo de edificação sustentável - Hospital Sara Kubitscheck, Salvador. | 48 |
| Figura 19 - Layout dos dutos da área de produção..... | 59 |
| Figura 20 - Layout dos dutos da área de montagem mecânica..... | 60 |
| Figura 21 – Admissão de ar à altura do piso (Estudo CFD)..... | 63 |
| Figura 22 – Admissão do ar à altura média (Estudo CFD) | 63 |
| Figura 23 - Mapa de calor. (A) Usinagem pré-projeto (B) Montagem pré-projeto (C) Usinagem pós projeto (D) Montagem pós projeto | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores limites máximos para concentração de substâncias | 20 |
| Tabela 2 – Classificação de ambientes de acordo com a norma EN 15251 | 53 |
| Tabela 3 – Índice IBUTG – NR15-Anexo 3..... | 55 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ABNT | – Associação brasileira de normas técnicas |
| ACGIH | – American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Association Advancing Occupational and Environmental Health) |
| ASHRAE | – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning for Engineers |
| ISO | – International Organization for Standardization |
| PMV | – <i>Predicted Mean Vote</i> (Voto médio estimado) |
| PPD | – <i>Percentage of people dissatisfied</i> (Porcentagem de pessoas insatisfeitas) |
| HVAC | – <i>Heating, ventilation and air conditioning</i> (Aquecimento, refrigeração e ar condicionado) |
| IBUTG | – Índice de bulbo úmido termômetro de globo |
| EAHE | – <i>Earth-to-air heat exchange</i> (Trocadores de calor solo-ar) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------------------|--|
| Q | vazão de ar (m ³ /min) |
| C _r | calor removido (kcal/h) |
| T _i – T _e | diferença de temperatura (°C) |
| t _{bn} | temperatura de bulbo úmido natural (°C) |
| t _g | temperatura de globo (°C) |
| t _{bs} | temperatura de bulbo seco (°C) |
| IBUTG | Índice de bulbo úmido termômetro de globo (°C) |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | CONFORTO TÉRMICO..... | 15 |
| 1.2 | IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO DE EDIFICAÇÕES..... | 17 |
| 1.3 | RELAÇÃO ENTRE CONFORTO TÉRMICO E PRODUTIVIDADE NO TRABALHO | 17 |
| 1.4 | OBJETIVOS..... | 17 |
| 1.5 | JUSTIFICATIVA | 18 |
| 2 | TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DA TEMPERATURA E CONFORTO TÉRMICO..... | 19 |
| 2.1 | VENTILAÇÃO | 19 |
| 2.1.1 | Introdução | 19 |
| 2.1.2 | Ventilação Natural..... | 25 |
| 2.1.3 | Ventilação mecânica | 30 |
| 2.1.3.1 | Insuflamento e exaustão | 30 |
| 2.1.3.2 | Sistema misto..... | 32 |
| 2.2 | REFRIGERAÇÃO | 34 |
| 2.2.1 | Introdução | 34 |
| 2.2.2 | Ar condicionado..... | 35 |
| 2.2.3 | Resfriamento evaporativo adiabático | 37 |
| 2.2.3.1 | Princípios físicos e de funcionamento | 37 |
| 2.2.3.1.1 | Resfriamento evaporativo direto – <i>Direct evaporative cooling (DEC)</i> | 37 |
| 2.2.3.1.2 | Resfriamento evaporativo indireto – <i>Indirect evaporative cooling (IEC)</i> | 39 |
| 2.3 | OUTRAS TECNOLOGIAS | 40 |
| 2.3.1 | Trocadores de calor acoplados ao solo – <i>Ground-coupled Heat Exchanger (GCHX)</i>..... | 41 |
| 2.3.2 | Ar condicionado solar | 43 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 2.3.3 | Arquitetura sustentável..... | 46 |
| 3 | INSTRUMENTAÇÃO E NORMAS | 49 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO..... | 49 |
| 3.2 | INSTRUMENTOS | 49 |
| 3.3 | NORMAS | 50 |
| 3.3.1 | ASHRAE Standard 55 | 50 |
| 3.3.2 | ISO 7730:2005 | 51 |
| 3.3.3 | EN 15251..... | 52 |
| 3.3.4 | NR-15 – Anexo 3 | 54 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 56 |
| 4.1 | INFORMAÇÕES GERAIS | 56 |
| 4.2 | OBJETIVOS DO PROJETO..... | 56 |
| 4.3 | DESCRIÇÕES DO PROJETO..... | 56 |
| 4.3.1 | Características construtivas básicas da edificação..... | 56 |
| 4.3.2 | Sistema inicial de ventilação | 57 |
| 4.4 | METODOLOGIA..... | 61 |
| 4.5 | PROPOSTAS DE MELHORIA | 64 |
| 4.6 | RESULTADOS E COMENTÁRIOS..... | 65 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 70 |
| | REFERÊNCIAS | 72 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONFORTO TÉRMICO

De acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning for Engineers* (ASHRAE) Standard 55, conforto térmico é o estado mental que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda (ANSI/ASHRAE, 2013). Sempre que o ambiente não apresentar níveis de conforto suficientes, o indivíduo irá apresentar as sensações de calor ou frio.

Para Rupp, Vasquez e Lamberts (2015), conforto térmico pode classificar-se de acordo com o ambiente de análise, podendo variar entre externo, semi-interno e interno, sendo este último passível de duas abordagens distintas. Inicialmente, tem-se o modelo de Fanger que serviu de base para as normas ISO 7730 e ASHRAE Standard 55. Há ainda o modelo adaptativo baseado nos estudos de edificações naturalmente ventiladas de Nicol e Humphreys (1970), modelo que leva em conta três fatores: psicológico, comportamental e fisiológico. Posteriormente, esta segunda abordagem foi adicionada em 2004 à ASHRAE standard 55 como método opcional de avaliação de ventilação natural em edificações; em 2007 foi incluída na norma EN 15251 e, por fim, com menção à proposta de conforto térmico brasileira. Em relação ao modelo de Fanger, ele visa prever a sensação térmica média de um grupo de pessoas e seu nível de insatisfação com o ambiente através do índice denominado Voto Médio Estimado (*PMV – Predicted Mean Vote*) por ele criado. Posteriormente, de forma complementar ao índice, fora sugerido o conceito de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied*), que leva em conta a avaliação dos indivíduos a cerca de um ambiente. Visando a aplicação prática, as normas fornecem valores tabelados das variáveis consideradas por Fanger. O autor considerou seis variáveis ao criar o PMV, duas delas relacionadas a fatores humanos (taxa metabólica e vestimenta) e quatro relacionadas a fatores ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar).

Fatores humanos:

- Taxa metabólica – variável de pessoa para pessoa, esta taxa muda de acordo com a atividade realizada, o ambiente, a idade e o sexo. Todo o calor excedente gerado pelo corpo é transmitido para a vizinhança por mecanismos de troca como condução,

convecção, radiação e evaporação (sudorese). Sempre que a temperatura corporal extrapolar os limites da temperatura ideal do corpo humano (aproximadamente 36°C), os mecanismos termorreguladores entram em ação, no frio, através do tremor, e no calor com a sudorese. A unidade utilizada para descrever o metabolismo é o MET, tendo como referencial a energia produzida por uma pessoa em repouso por unidade de área, em números: $1 \text{ MET} = 58 \text{ W/m}^2$.

- Vestimenta – Utiliza o conceito de resistência térmica para descrever como os mais variados tipos de roupas atuam na troca do calor corporal por convecção. Utiliza o CLO como unidade de medição da resistência térmica da roupa, em números – desse modo, $1 \text{ CLO} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Fatores ambientais

- Temperatura do ar – Também chamada de temperatura de bulbo seco (TBS), é medida com a exposição de um termômetro comum ao ambiente bloqueando, entretanto, a radiação e umidade. Conforto térmico se relaciona com esta variável, pois, à medida que a temperatura do ar aumenta, menos denso ele se torna subindo para a descida do ar mais frio. Esta movimentação das massas de ar, chamada de convecção natural, cria a sensação de resfriamento corporal e do ambiente.
- Temperatura média radiante – Idealização da temperatura de um ambiente real tomando como base a temperatura uniforme de um meio imaginário. Nos dois ambientes, as trocas de calor por radiação seriam equivalentes. Pode ser mensurada através do uso de um termômetro de globo negro, um radiômetro de duas esferas, um sensor esférico, dentre outros.
- Velocidade do ar – Este parâmetro altera o coeficiente convectivo de transferência de calor. Logo, quando se aumenta a velocidade do ar, aumenta-se o coeficiente e conseqüentemente a troca de calor por convecção, proporcionando um maior resfriamento corporal reduzindo a sensação de calor, desde que se mantenha as outras variáveis constantes. Agregado à umidade do ar, determina a perda de calor por evaporação.
- Umidade relativa – Relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade de água total que poderia haver (ponto de saturação) numa mesma temperatura. A umidade presente no ar interfere nas trocas de calor por evaporação e na qualidade no ar interferindo, portanto, no processo de respiração.

1.2 IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Conforme afirma Mazon (2005), a ventilação se tornou de grande importância em edificações devido à sua presença em praticamente todos os ramos, desde aplicações industriais, residenciais, agrícolas e em processos diversos. Quando se refere a ambientes ocupados pelo homem, a ventilação se torna uma aliada ao fornecer níveis ideais de conforto (embora limitado) e segurança ao diluir poluentes e gases. Além disso, a ventilação tem como principal função renovar o ar, provendo padrões ideais para utilização humana e animal no que diz respeito a qualidade do ar. Ainda, se for levada em conta a ventilação natural, por consequência são atingidos níveis de iluminação ideais devido às aberturas, janelas e outros elementos arquitetônicos adicionados à edificação, refletindo, portanto, na eficiência energética da edificação.

1.3 RELAÇÃO ENTRE CONFORTO TÉRMICO E PRODUTIVIDADE NO TRABALHO

A característica humana homeotérmica determina que o homem esteja em constante interação com o ambiente que o cerca de forma a realizar constantes trocas térmicas que o permite manter sua temperatura quase constante. A busca pela satisfação térmica promove mudanças de comportamento e produtividade, apesar de difícil avaliação. O estudo de Rupp, Vasquez e Lamberts (2015) cita variados casos desta relação entre conforto térmico e produtividade nos mais variados tipos de clima ao redor do globo. Um exemplo relevante diz respeito ao Japão, onde os autores impuseram uma variação nas condições de temperatura e ventilação e concluíram que, naquela localidade, a temperatura máxima recomendada seria de 27 °C com consequente perda de aproximadamente 6,6% da produtividade caso a temperatura fosse além deste limite.

1.4 OBJETIVOS

- Principal - Revisar, de forma criteriosa, as tecnologias atualmente utilizadas para ventilação e climatização de ambientes, e estudar alternativas a estas tecnologias de forma a auxiliar o desenvolvimento de uma edificação sustentável.

- Secundário - Aplicar os conhecimentos adquiridos no projeto de melhoria do sistema de ventilação de uma planta industrial.

1.5 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Banco Mundial (2014), é esperado que mais de 70% da população mundial estará localizada nos grandes centros urbanos até o ano de 2050. Além disso, até o ano de 2030, 85% da população estará concentrada nos países em desenvolvimento. Este aumento populacional nos grandes centros e em países em desenvolvimento irá aumentar a demanda energética para ventilação forçada e sistemas de ar condicionado em edificações, atualmente responsáveis por aproximadamente um terço do consumo (*Energy Information Administration, 2012*). Como consequência deste aumento de demanda, aumenta-se também a emissão de gases estufa, responsáveis diretos pelo aquecimento global e em grande parte provenientes de sistemas de ar condicionado.

Neste contexto, surge a importância do desenvolvimento de edificações sustentáveis que reduzem a demanda energética e conseqüentemente as emissões de gases estufa. Surge ainda o conceito de “edificações de zero energia”, como descreve Kylili e Fokaides (2015), que se referem a construções com taxa zero de emissão de carbono alcançadas através da redução da demanda e melhor aproveitamento dos recursos renováveis. Assim, o texto busca revisar e fornecer alternativas deste melhor aproveitamento energético no âmbito de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), bem como tratar de alternativas de baixo ou nenhum consumo energético visando a melhora dos índices de conforto térmico.

2 TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DA TEMPERATURA E CONFORTO TÉRMICO

Tendo em vista o objetivo deste trabalho, faz-se necessário uma revisão bibliográfica em torno dos tópicos que descrevem as atuais e mais comuns tecnologias para ventilação e refrigeração, bem como a apresentação de novos conceitos e tecnologias, sejam estas em fase de desenvolvimento através de pesquisas ou ainda, por meio de um estudo do potencial da região adequando-se o projeto arquitetônico.

O capítulo se inicia com a definição dos conceitos e tecnologias sobre ventilação, em seguida abordam-se tópicos de refrigeração e climatização de ambientes, concluindo com a introdução de novas tecnologias e conceitos.

2.1 VENTILAÇÃO

2.1.1 Introdução

A ventilação pode ser dividida em dois ramos, a ventilação geral e a local exaustora. Na ventilação geral, procura-se deslocar grandes volumes de ar de um recinto de forma que o mesmo se renove periodicamente. Esta renovação permite o controle da temperatura ambiente, umidade, agentes microbiológicos, dentre outros, assegurando assim a qualidade do ar e conseqüentemente a segurança de seus frequentadores. Neste tipo de ventilação, têm-se duas vertentes (MACINTYRE, 2002; MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1977):

1 – A ventilação para a manutenção do conforto térmico e eficiência do homem no ambiente de trabalho;

2 – A ventilação como forma de controle dos poluentes para a manutenção da saúde e segurança do homem; também chamada de ventilação geral diluidora.

Na ventilação local exaustora, o objetivo é captar quaisquer tipos de gases, fumos ou poeiras na própria fonte. Esse cuidado é necessário quando a concentração de poluentes presentes é alta e por apresentarem em geral alta toxicidade, de modo que não se pode dispersar estes gases na atmosfera ou diluir no ambiente. A ventilação local exaustora deve sempre ser utilizada quando algum processo ou atividade contaminar o meio de modo a

colocar em risco a saúde ou segurança do indivíduo de diversas maneiras. Segundo Macintyre (2002), altos níveis de poluentes podem causar ao indivíduo:

- Irritação da mucosa e da pele;
- Males irreversíveis aos tecidos;
- Narcose, ou seja, alteração do estado de consciência devido à intoxicação por substâncias.

Portanto, para limitar as concentrações de poluentes a níveis aceitáveis, foram criados pela ACGIH os seguintes índices:

- TLV-TWA (*Threshold Limit Value – Time Weighted Average*) – Toma como base uma média ponderada da máxima concentração a que trabalhadores podem ser expostos, sem efeitos adversos, numa carga horária de 40 horas semanais;
- TLV-STEL (*Threshold Limit Value – Short Term Exposure Limit*) – Determina a máxima concentração a que trabalhadores podem ser expostos continuamente, por curto período de tempo, sem sofrerem os efeitos adversos;
- TLV-C (*Threshold Limit Value – Ceiling*) – Limita a máxima concentração, não importando o intervalo de tempo trabalhado.

A Tabela 1, divulgada pela ACGIH (1986), exemplifica o uso destes índices fornecendo máximas concentrações para algumas substâncias em duas unidades distintas:

Tabela 1 - Valores limites máximos para concentração de substâncias

| Substâncias | TLV-TWA | | TLV-STEL | |
|-------------------------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
| | ppm | mg/m ³ | ppm | mg/m ³ |
| Cloreto de metila | 50 | 105 | 100 | 205 |
| Cloreto de metileno (diclorometano) | 100 | 350 | 500 | 1.740 |
| Cloreto de vinila (cloroetileno) | 5 | 10 | - | - |
| Cloro, óxido de (Cl ₂ O) | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,9 |
| Cloroacetaldeído (limites máximos) | 1 | 3 | - | - |
| Clorobenzeno | 75 | 350 | - | - |
| Clorodifenil (54% cloro) | 0,5 | 1 | - | - |
| Cloroetileno (cloreto de vinila) | 5 | 10 | - | - |
| Clorofórmio (triclorometano) | 10 | 50 | 50 | 225 |
| Cloroprene | 10 | 35 | - | - |

Fonte: (ACGIH, 1986)

Além de riscos à saúde, a alta concentração de poluentes promove riscos à integridade física, sendo possíveis causadores de acidentes, como incêndios e ou explosões.

Quando se deseja dimensionar uma unidade exaustora local, o projeto consiste da especificação dos seguintes componentes (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1977):

- Captor: dispositivo localizado a curta distância da fonte geradora de poluentes com o intuito de coletar o contaminante diluído no ar;
- Exaustor: responsável por movimentar a massa de gases. Inicia criando uma pressão negativa (ou de vácuo) entre o captor e a entrada do exaustor. Em seguida, passa-se então para uma pressão positiva a partir da saída, responsável por guiar esta massa de ar até a atmosfera exterior;
- Rede de dutos: estruturas responsáveis pela condução do ar, desde o captor até a atmosfera;
- Filtros, lavadores de gases ou outros tipos de purificadores: tem a função de reter as partículas poluidoras dos gases antes que estas sejam lançadas na atmosfera livremente. Para os lavadores de gases utiliza-se, em geral, água como o meio de reter as partículas suspensas no ar. O ar poluído entra no lavador e colide com as partículas de água que retém seus poluentes, sendo que, após este processo é admissível seu lançamento para o ambiente externo. Finalmente, existem outras técnicas para limpeza destes gases como coletores gravitacionais e ciclones, tendo seu uso restringido e por vezes limitado para apenas alguns processos e casos especiais.

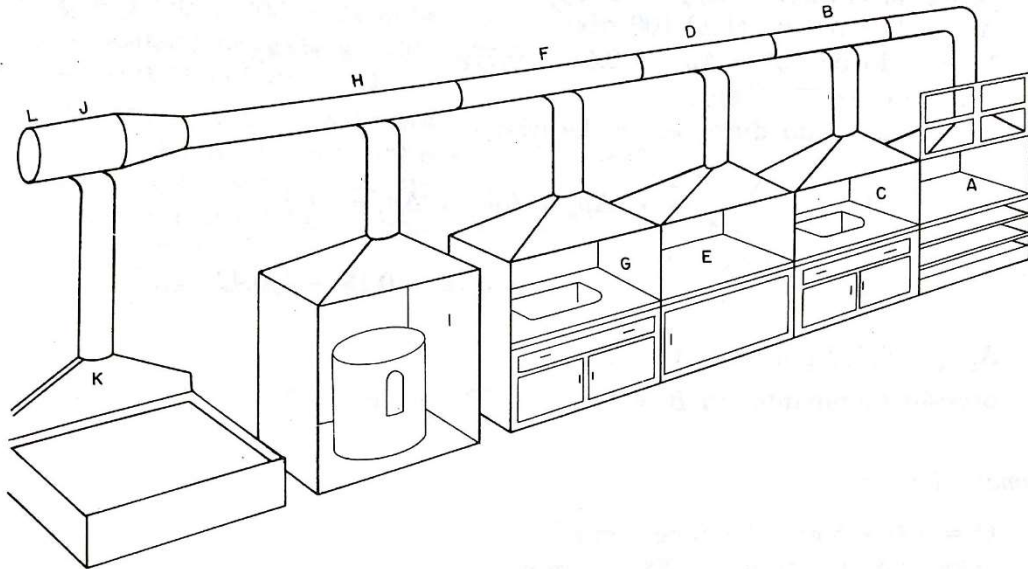
As unidades filtrantes consistem de meios porosos que têm por finalidade reter partículas suspensas no ar. Os tipos mais comuns de filtros são:

- Filtros em painéis compactados;
- Filtros de tecidos (manga, tubo, envelopes, dentre outros);
- Filtro de fibra de vidro;
- Filtro de carvão ativado.

De simples funcionamento, o processo de exaustão local se inicia com a coleta dos gases, realizada pelo sistema de captores, sendo então enviados através das redes de tubulações com auxílio de ventiladores para as unidades filtrantes ou ainda lavadores de gases

– quando necessário - para posterior lançamento na atmosfera. A Figura 1 apresenta um *layout* de como deve ser tal instalação.

Figura 1 - Unidade de exaustão local



Fonte: (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1977).

De acordo com a ACGIH (1986), algumas aplicações que exigem a introdução de uma unidade exaustora local são:

- Coifas para fogões, mesas quentes, fervura de lavagem;
- Captor para esmeril;
- Cabines de pintura;
- Tanques de desengraxe;
- Bancada para soldagem;
- Spray de metalização;
- Corte com oxiacetileno;
- Serra (circular, radial, fita, dentre outros.);
- Trabalho em granito e mármore;

- Fundição em moldes;
- Ensacamento (grãos);
- Politriz vertical;
- Forno cadinho basculante;
- Torno mecânico operando com materiais de alta toxicidade;
- Forno de secagem.

Neste trabalho, entretanto, será focada a atenção para a ventilação geral dividindo-a, portanto, em sub-tópicos de forma a detalhar cada um deles e indicando as tecnologias disponíveis. A ventilação geral pode ser dividida em:

- Ventilação natural, na qual a exaustão ou admissão de ar se dá de forma passiva, ou seja, utilizando diferenças de pressões, velocidade dos ventos, posição geográfica, altitude, e assim por diante;

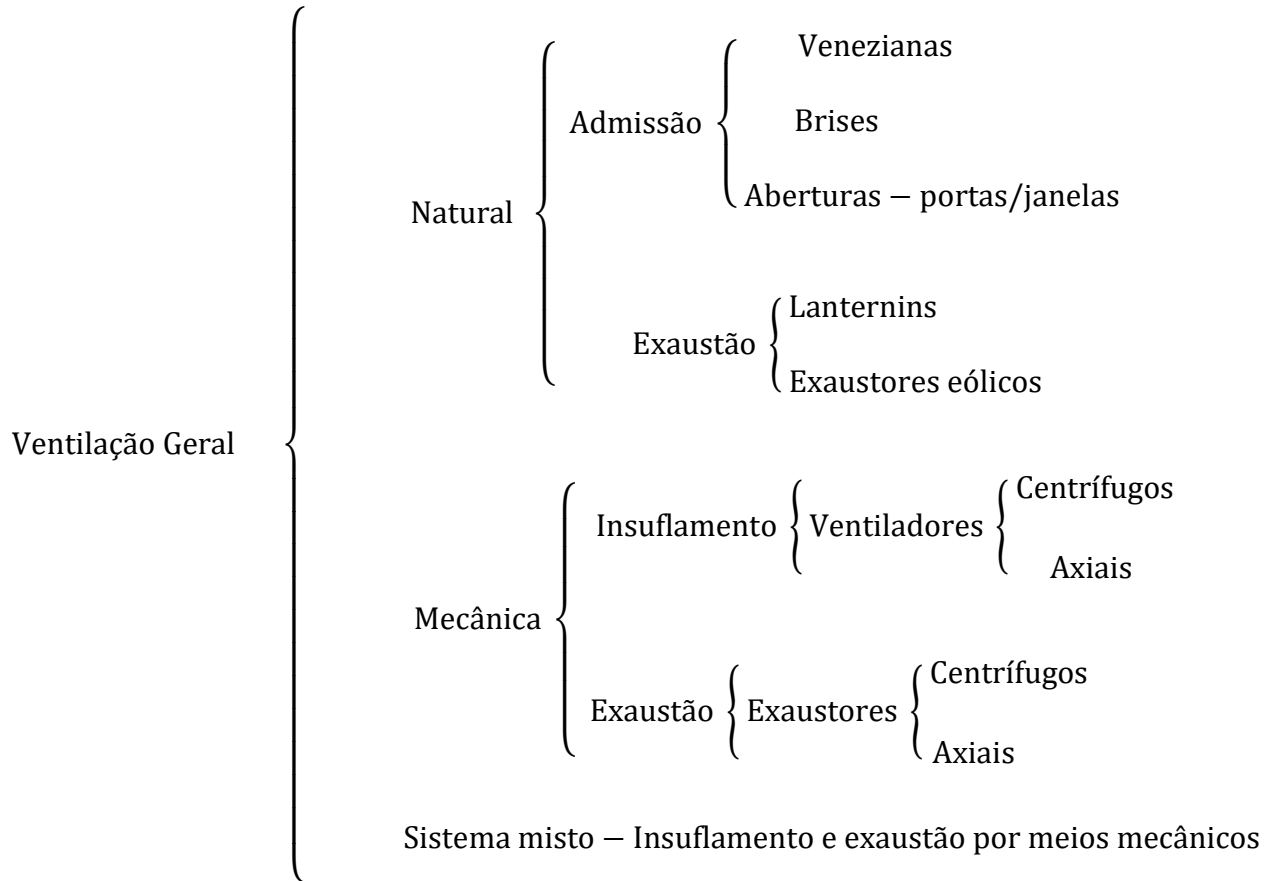
- Ventilação mecânica, na qual a exaustão ou admissão de ar se dá de forma ativa, ou seja, utilizando meios mecânicos de deslocamento das massas de ar com gasto de energia proveniente de uma fonte externa.

Ambas as formas de ventilação podem ser combinadas da seguinte maneira, de modo a promover o melhor desempenho para cada aplicação:

- Admissão e exaustão por meios naturais;
- Insuflamento mecânica e exaustão natural;
- Insuflamento natural e exaustão mecânica;
- Insuflamento e exaustão mecânica, designando o chamado sistema misto.

Pode-se esquematizar a ventilação geral na forma apresentada na Figura 2:

Figura 2 – Classificação da ventilação geral



Fonte: Autoria própria.

Quando se está interessado na remoção de calor do ambiente através da renovação constante do ar e, conhecendo a quantidade de calor a ser removida, seja ele gerado por pessoas, infiltrações, máquinas, incidência solar, iluminação, ou qualquer outro meio e tendo em mente a diferença de temperatura desejada, pode-se aplicar a equação (1) para determinar a vazão necessária:

$$Q = \frac{C_r}{20,10(T_i - T_e)} \quad (1)$$

Sendo:

Q = vazão de ar (m³/min);

C_r = calor removido (kcal/h);

$T_i - T_e$ = diferença de temperatura (°C).

É importante observar que esta vazão pode ser atingida não apenas por meios naturais bem como forçados ou por uma combinação de ambos.

Para atingir os níveis ideais de conforto e segurança, foram estabelecidos padrões por entidades internacionais, como a ASHRAE e nacionais, como a ABNT. No capítulo três, serão apresentadas as principais normas que devem ser consideradas quando do projeto de sistemas de ventilação, de forma a fornecer valores mínimos de renovações de ar utilizando também índices diversos para avaliação como, por exemplo, o IBUTG e a umidade para serem aplicados na decisão entre tecnologias ativas e passivas.

2.1.2 Ventilação Natural

Segundo dados do *Energy Information Administration (EIA, 2012)*, nos países desenvolvidos, ventilação mecânica e sistemas de ar condicionado em edifícios são responsáveis por um terço de todo o consumo de energia. De acordo com Aflaki et al. (2015), em seu estudo sobre aplicação de ventilação natural, o autor afirma que o crescimento populacional, em especial nas grandes cidades, elevou o consumo de energia requerida para resfriamento e aquecimento de ambientes em aproximadamente 6,7% no mundo, sendo os aparelhos de ar-condicionado responsáveis por grande parte deste aumento. Neste contexto, conforme afirma Allocca, Chen e Glicksman (2003), edificações que utilizam ventilação natural podem reduzir em até 40% o consumo de energia ao optarem por esta técnica ao invés do uso de ar-condicionado.

Para a ventilação natural, tanto a admissão quanto a exaustão são realizadas de forma passiva, ou seja, sem gasto de energia proveniente de fonte externa, entretanto, com sua eficácia limitada e determinada por fatores como microclima externo (velocidade e direção dos ventos), natureza do terreno, design da edificação (AFLAKI et al., 2015) e até mesmo níveis de ruídos e poluição local (ALLOCCA; CHEN; GLICKSMAN, 2003). Para ambientes urbanos, Ghiaus et al. (2006) cita limitações como baixa velocidade dos ventos, e repete os efeitos das altas temperaturas geradas pelas ilhas de calor, ruídos e poluição.

Na ventilação natural, faz-se menção à importância do projeto arquitetônico que, se desenvolvido de maneira correta e levando-se em conta fatores como regime de ventos, posição geográfica, altitude, entre outros, pode fornecer à edificação uma ventilação eficaz sem o auxílio de tecnologias ativas, para ambientes onde não se exige a necessidade de climatização. Devido à relevância do tópico, no final do capítulo serão apresentados exemplos bem-sucedidos de tais conceitos.

Idealmente, deve-se buscar sempre o uso da ventilação natural em detrimento da ventilação forçada por apresentar os seguintes benefícios (AFLAKI et al., 2015; KUBOTA; AHMAD, 2006; EVOLA; POPOV, 2006):

- Consumo mínimo de energia;
- Não emissão de gases estufa;
- Nenhuma ou pouquíssima manutenção (manutenção inadequada dos sistemas de ventilação e ar condicionado está ligada a problemas de saúde);
- Operação silenciosa;
- Custos de operação reduzidos;
- Maior vida útil;
- Melhor qualidade final do ar.

De acordo com Toledo (1999) a ventilação natural baseia-se nos seguintes princípios:

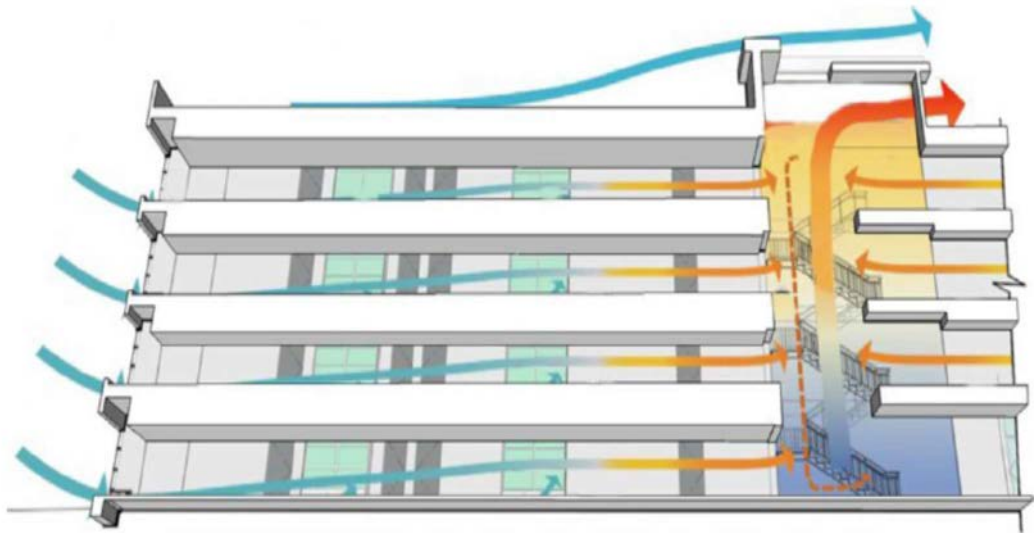
1 – Efeito chaminé: criado pela diferença de temperatura entre as massas de ar interna e externa gerando, portanto, uma diferença de densidades. Desta forma, ao adentrar o recinto, a massa de ar mais fresca tende a elevar a massa de ar aquecida do interior, promovendo sua exaustão. Em geral, para ambientes fabris, a massa de ar se aquece devido à presença humana, sistemas de iluminação e máquinas.

2 – Ação dos ventos: as fachadas das edificações, ao receberem os ventos incidentes, criam regiões de sobre-pressão e sob-pressão, em outras palavras, regiões com pressões maior e menor que a atmosférica, respectivamente. Influenciam nos valores característicos como forma e dimensões do prédio, direção e tipo de vento incidente. Na fachada onde o vento

incide, cria-se uma pressão maior, como consequência na fachada oposta, cria-se uma pressão menor, portanto, esse diferencial permite que fluxo de ar adentre o recinto.

Como afirma Allocca, Chen e Glicksman (2003), as taxas de ventilação natural dependem da intensidade e direção destas formas bem como das resistências oferecidas pela edificação a penetração do vento. Na Figura 3, ilustra-se a ação de ambos os efeitos, a saída superior do edifício (seta em vermelho) cria uma região de menor pressão permitindo a exaustão da massa de ar aquecida pelo efeito chaminé e as aberturas, posicionadas ao encontro dos ventos, permitem a entrada de ar na edificação. Pode-se mencionar ainda a ação da corrente de vento na parte superior da edificação, onde se cria uma região de baixa pressão na abertura devido à passagem do fluxo de ar. Este efeito, portanto, se caracteriza como um potencializador do efeito chaminé.

Figura 3 - Ventilação natural devido à força dos ventos e efeito chaminé

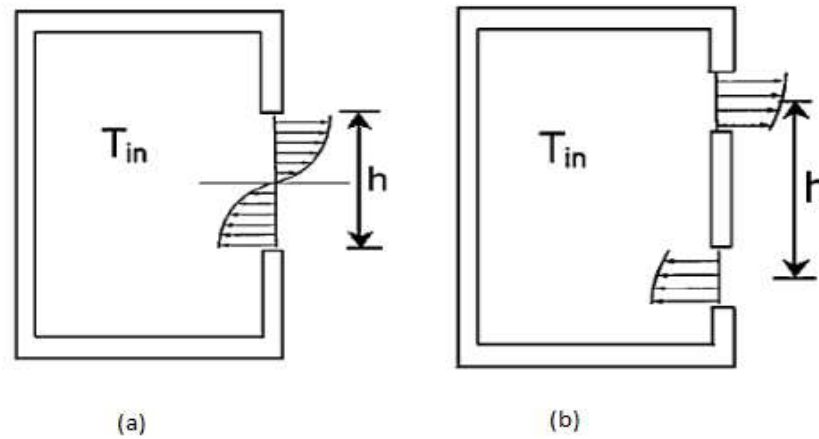


Fonte: (AFLAKI et al., 2015).

Pode-se dividir ventilação natural em: lado simples (*single-sided*) ou cruzada (*cross-ventilation*). Na ventilação de lado simples utiliza-se apenas uma abertura, de forma que o fluxo de ar entra e sai por ela, como demonstra a Figura 4– (a). Na ventilação cruzada, por outro lado, utiliza-se diferentes aberturas para admissão e exaustão do fluxo de ar (Figura 4 - (b)). Para este tipo de ventilação, há algumas orientações, ou boas práticas que fornecem melhor aproveitamento e evitam-se as chamadas zonas de curto-circuito. A Figura 5 fornece

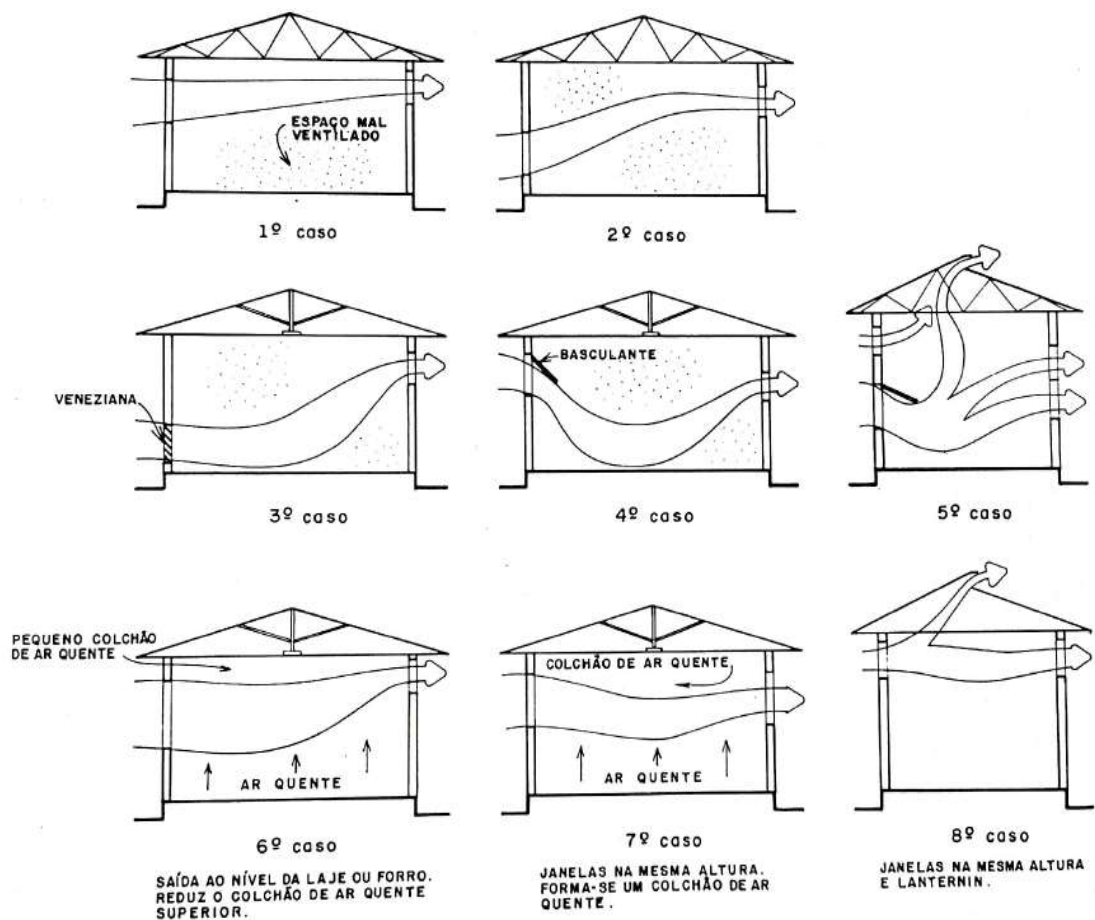
algumas destas práticas que buscam o melhor posicionamento das aberturas bem como situações que devem ser evitadas.

Figura 4 - (a) Ventilação de lado simples; Ventilação cruzada (b)



Fonte: (ALLOCCA; CHEN; GLICKSMAN, 2003).

Figura 5 - Casos típicos de ventilação natural em galpões



Fonte: (MACINTYRE, 2002).

Embora a ventilação cruzada ofereça maior eficiência em comparação à simples, há algumas situações em que deve ser evitada. Como exemplifica Allocca, Chen e Glicksman (2003), em algumas edificações americanas, devido a requerimentos de segurança, códigos de incêndio, arquitetura e privacidade, dá-se preferência à ventilação de lado simples.

Tanto para a admissão quanto para a exaustão por meios naturais, alguns dispositivos e elementos arquitetônicos devem ser considerados de forma a auxiliar e facilitar a troca de ar entre ambientes.

- Para a admissão:

- Aberturas: Caracterizadas por portas e janelas, são responsáveis não só pela admissão como também pela exaustão do ar do ambiente. Para a admissão, devem ser posicionadas na lateral onde se encontra o regime de ventos local, em outras palavras, na região de formação de uma pressão positiva. Se tratando da exaustão, idealmente as aberturas devem ser posicionadas na lateral oposta sempre procurando obter a maior diferença de alturas que o projeto permitir.

- Brise-soleil: Palavra de origem francesa e popularmente conhecida como ‘quebra-sol’, este dispositivo tem a função de limitar a incidência de luz solar em um ambiente, de modo a amenizar o aquecimento interno. Podem ser fabricados em madeira ou metal, sendo dispostos na fachada de edifícios. Apresenta as configurações fixo e móvel – permitindo o ajuste de acordo com a posição do sol.

- Venezianas: são dispositivos feitos de lâminas que criam diversas frestas para a entrada de ar por meio da diferença de densidade entre o ambiente interno e externo. Em geral são feitas de aço ou alumínio, podendo ainda ser confeccionadas com diversos tipos de plásticos ou madeira. Apresenta ainda, além da ventilação, a característica de controle da luminosidade natural do ambiente interno, com simples ajustes de suas grelhas.

- Para a exaustão:

- Lanternins: são aberturas posicionadas nos telhados de galpões, com a intenção de criar uma região de baixa pressão. Essa região favorece a massa de ar menos densa do galpão a ser exaurida de forma natural, criando, uma corrente convectiva ascendente devido à diferença de pressão.

- Exaustores eólicos: Os exaustores eólicos possuem a mesma finalidade que os lanternins, apresentando em geral um custo menor. Seu funcionamento está ligado a corrente de vento

externa e a diferença de densidade das massas de ar, que favorecem sua movimentação. São confeccionados geralmente em dimensões padrão, utilizando um material leve, como alumínio e rolamentos.

2.1.3 Ventilação mecânica

Devido à ventilação natural depender de variáveis não controladas pelo homem, como regime de ventos, temperatura, umidade, dentre outros, a mesma não possui muitas vezes condições de garantir um grau de confiabilidade e eficiência para atender as necessidades de conforto térmico e dispersão de poluentes. Sempre que ocorrerem casos como estes, ou quando houver necessidade de um maior controle, faz-se necessidade de recorrer a tecnologias ativas. Vale ressaltar que para um controle completo de todas as variáveis, somente é possível alcançar tais resultados utilizando centrais de ar condicionado. Entretanto, na maioria das vezes, não há necessidade da instalação de tais centrais, podendo-se usar apenas ventilação mecânica. Outras situações que favorecem o uso da ventilação forçada são (MACINTYRE, 2002):

- Quando se deseja uma maior vazão;
- Para evitar que uma massa de ar contaminada adentre ao recinto (devido à pressão positiva criada);
- Para diluir poluentes provenientes de processos diversos;
- Para remoção de calor proveniente de máquinas, entre outros.

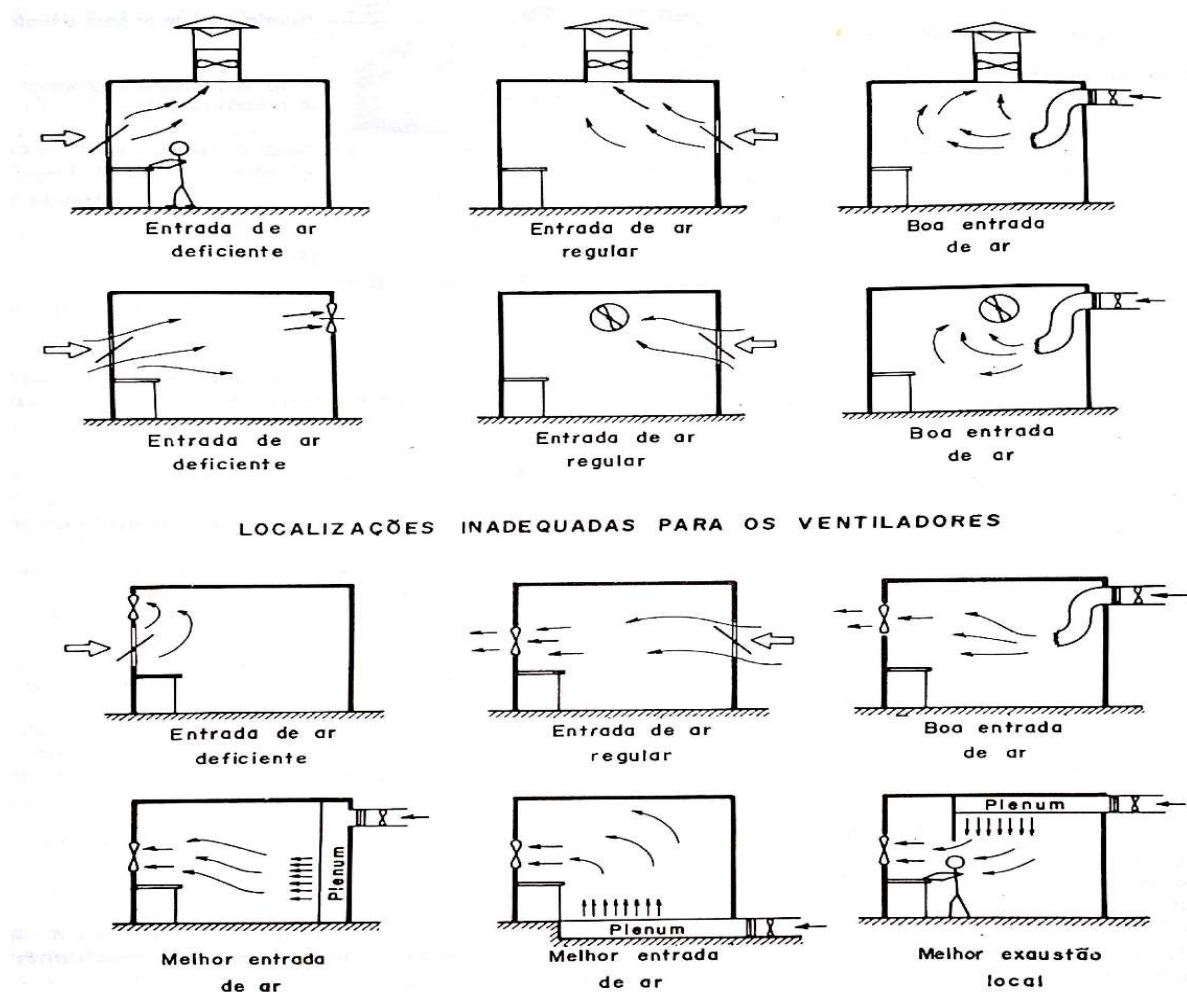
2.1.3.1 Insuflamento e exaustão

Insuflar significa adicionar ar no interior de edificações utilizando ventiladores. Ao se realizar este procedimento, cria-se no espaço uma pressão maior, ou pressão positiva, forçando a saída do ar, através de aberturas, onde se encontram regiões de baixa pressão promovendo a circulação de ar e arejamento do ambiente. Em geral, ventiladores podem ser instalados de dois modos: captando ar e insuflando diretamente sobre a área (quando posicionado de forma a admitir ar livremente - na parede) ou, afastado do local de insuflamento sendo o ar conduzido através de dutos denominados 'plenum'. Já em relação à

exaustão, utilizam-se ventiladores de forma a extrair o ar ambiente criando-se, portanto, uma pressão negativa no recinto. Do mesmo modo, pode-se utilizar dutos ou instalar diretamente na área.

Para garantir uma melhor circulação de ar no recinto, provocando o efeito desejado, deve-se ter um correto posicionamento tanto do (s) ventilador (es) quanto das saídas de ar, buscando criar correntes que se estendam por todo o galpão; evitando-se, portanto, a criação de zonas de não circulação de ar, chamadas de zona morta ou ainda zona em curto-circuito. Em geral, para uma boa ventilação, recomenda-se o maior desnível possível entre a tomada de ar (pressão positiva) e a saída (pressão negativa), preferencialmente posicionadas em paredes opostas. Deste modo, evitam-se regiões estagnadas onde o ar mantém-se recirculando, enquanto outras regiões são bem atendidas. Há algumas recomendações da ACGIH (1977) para posicionamento adequado de ventiladores, como mostra a Figura 6:

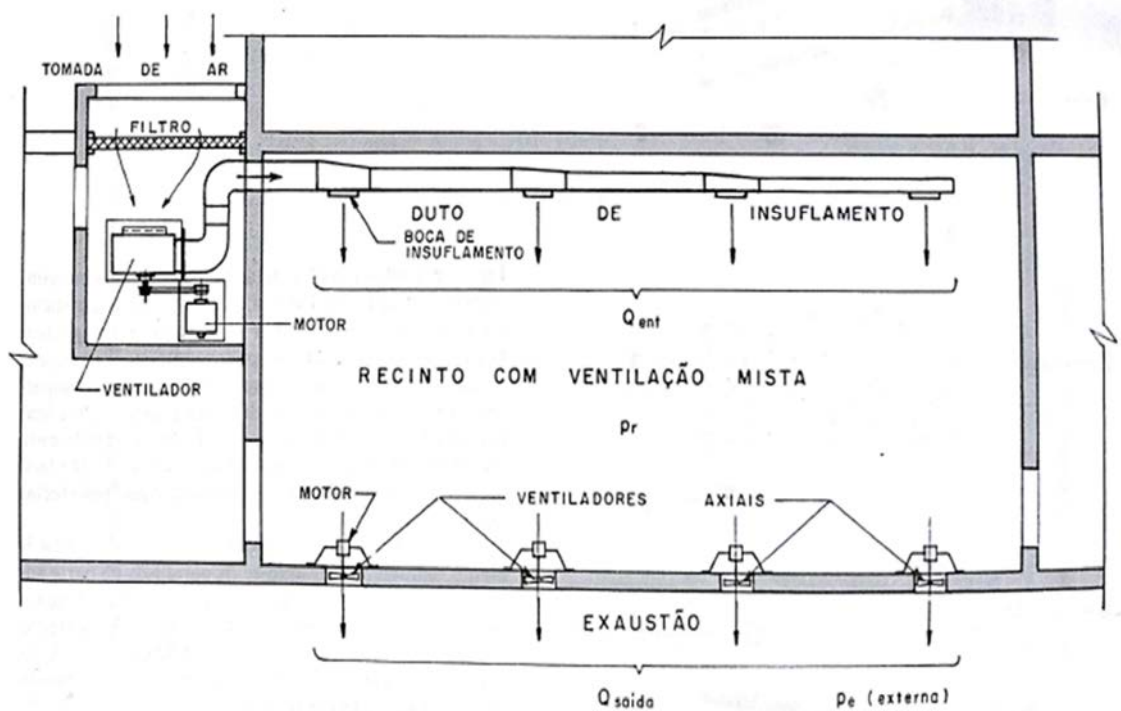
Figura 6 - Localização dos ventiladores segundo a ACGIH



2.1.3.2 Sistema misto

Denomina-se sistema misto quando se utiliza uma combinação de insuflamento e exaustão mecânica permitindo, portanto, o controle da pressão e dos poluentes diluídos no recinto. A Figura 7 mostra um exemplo de planta baixa contendo o sistema misto, com insuflamento fornecido através de dutos e unidade externa de ar e exaustão através de ventiladores instalados nas paredes.

Figura 7 - Sistema misto de ventilação



Fonte: (MACINTYRE, 2002).

Tanto o insuflamento quanto à exaustão, fazem o uso da mesma tecnologia: o ventilador. Ventiladores são máquinas de fluxo utilizadas para gerar o escoamento de um determinado fluido, normalmente o ar, através duma rede de dutos. Em geral, são compostos de um elemento rotativo como pás ou lâminas acopladas a um rotor que têm por função impulsionar o fluido transferindo-lhe a energia fornecida usualmente por um motor elétrico ou menos comum por motores hidráulicos e motores de combustão interna. Comparativamente, pode-se dizer que compressores e bombas hidráulicas utilizam o mesmo princípio, entretanto, se diferem por fornecem maior pressão e trabalhar com outros tipos de fluido,

respectivamente. Para análises e cálculos, modela-se o fluido a ser utilizado no ventilador como incompressível, se diferenciando da análise de uma máquina térmica, por exemplo.

- Classificações dos ventiladores

De acordo com Macintyre (2002), ventiladores podem ser classificados segundo os seguintes aspectos:

- Quanto à faixa de pressão de trabalho:
 - Baixa pressão: até uma pressão efetiva de 200 mmH₂O;
 - Média pressão: entre 200 a 800 mmH₂O;
 - Alta pressão: entre 800 a 2.500 mmH₂O;
 - Muito alta pressão (turbos compressores): entre 2.500 a 10.000 mmH₂O.
- Quanto à modalidade construtiva:
 - centrífugos: neste tipo de ventilador o conjunto rotor/pás recebe o nome especial de impelidor, que promove um escoamento perpendicular ao eixo de rotação. Quando comparados aos axiais são mais silenciosos.

Usos: controle de temperatura, processos industriais, secadores de cabelo, insufladores de colchões e bexigas, dentre outros;

- hélico-centrífugos;
- axiais: pás são desenhadas de modo que o escoamento se mova paralelo ao eixo de rotação.

Usos: ventiladores de teto, ventilador automotivo para uso em radiadores, em *coolers* de componentes elétricos, dentre outros.

- Quanto à forma das pás:
 - pás radiais retas;
 - pás inclinadas para trás;

- pás inclinadas para frente;
- pás curvas de saída radial.
- Quanto ao número de entradas de aspiração:
 - entrada unilateral ou simples aspiração;
 - entrada bilateral ou dupla aspiração;
- Quanto ao número de rotores:
 - simples estágio, com um rotor;
 - duplo estágio, com dois rotores no mesmo eixo.

2.2 REFRIGERAÇÃO

2.2.1 Introdução

Refrigeração é o processo de movimentação de energia na forma de calor para ambientes onde não é indesejado (MILLER; MILLER, 2008). Para o calor poder ser retirado de um ambiente mais frio e rejeitado para outro mais quente, contrariando o sentido natural do fluxo, deve-se sempre promover a realização de trabalho, em geral, trabalho mecânico atuando como parte de um ciclo.

Certamente, a mais conhecida e ampla aplicação desta tecnologia é para a climatização empregando o uso de aparelhos de ar condicionado acionados por sistemas de compressão mecânica em ambientes industriais, residenciais e comerciais como galpões ou salões, *shoppings*, casas e ainda em meios de transporte como automóveis, trens e aviões. Entretanto, a refrigeração tem importância em diversos outros processos. Na indústria a refrigeração é de grande importância onde é aplicada em variadas operações como, por exemplo, tanques criogênicos, resfriamento de líquidos, liquefação de gases, resfriamento de máquinas e assim por diante. Tanto no âmbito residencial quanto comercial, outra aplicação bastante conhecida é para “freezers” e refrigeradores utilizados na conservação de alimentos perecíveis.

2.2.2 Ar condicionado

Unidades de ar condicionado são aparelhos utilizados quando se deseja filtrar, desumidificar, esfriar e circular o ar ambiente. Em geral se apresentam na forma de eletrodomésticos para uso residencial quando se tem a intenção de promover conforto térmico (MILLER; MILLER, 2008). Para Gugulothu et al. (2015), um sistema de ar condicionado se baseia no arranjo sequencial de uma série de componentes e equipamentos que, quando dispostos de forma ideal, permitem:

- Fornecimento da energia necessária para aquecer ou resfriar um ambiente;
- Fornecimento de um ar quente ou frio, úmido ou seco, limpo e purificado;
- Distribuição de ar condicionado para um espaço interno.

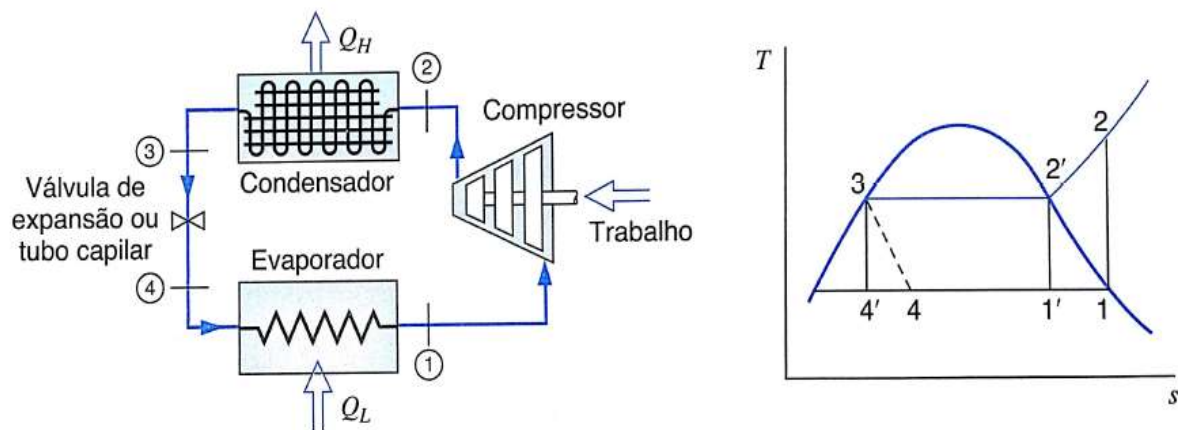
Além disso, o emprego desta tecnologia se apresenta como a única opção para o total controle de parâmetros como temperatura, umidade, limpeza, movimentação de ar, níveis sonoros e pressão. Atualmente, sendo o meio mais difundido e utilizado para a refrigeração de ambientes, pode-se encontrar sua aplicação em:

- Edifícios institucionais (escolas, universidades, livrarias, hospitais, estádios);
- Edifícios comerciais (escritórios, lojas, shoppings, supermercados, restaurantes);
- Edifícios residenciais (hotéis, casas, albergues);
- Fábricas;
- Setor de transportes (aviões, carros, trens, ônibus, navios).

Compressor, condensador, evaporador, bombas, válvulas de expansão, dentre outros, são os dispositivos básicos de um sistema de ar condicionado. A combinação adequada destes equipamentos e a escolha do gás refrigerante ideal permite a configuração de ciclos de refrigeração. Dentre as diversas configurações de ciclos existentes, com o uso destes componentes e gases refrigerantes específicos, destacam-se o ciclo de refrigeração por absorção de amônia e o ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Partindo deste ciclo básico, podem-se promover modificações que melhorem sua eficácia como, por exemplo, utilizando-se a compressão em duplo estágio ou um regenerador. A Figura 8 ilustra o ciclo básico da refrigeração por compressão de vapor em condição ideal. O processo inicia-se em

(1), com a compressão do fluido refrigerante inicialmente no estado de vapor saturado. Em seguida, o fluido segue ao condensador (2) onde se liquefaz ao trocar calor com o ambiente externo para então seguir a válvula de expansão (3) onde é vaporizado à pressão constante. Essa vaporização resulta num abaixamento da temperatura do gás, que ao ser guiado ao evaporador (ambiente interno) irá extrair o calor do ambiente promovendo sua mudança de fase e conseqüente refrigeração (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

Figura 8 - Ciclo básico por compressão de vapor



Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

Quanto aos gases refrigerantes, podem ser definidos como uma substância ou mistura fluida que por possuírem certas propriedades são utilizados nos ciclos termodinâmicos de refrigeração. Em geral, são de grande preocupação do ponto de vista ambiental por agredirem a camada de ozônio e favorecerem o aquecimento global devido ao efeito estufa provocado pelos usos dos gases CFCs, HCFCs e HFCs. Historicamente, para uso em aparelhos de ar condicionado, utilizavam-se os gases R-11 e R-12 ou *Freon-12* (nome comercial). Apesar da estabilidade e segurança que estes gases apresentam, em caso de vazamento, os mesmos atingem a atmosfera superior, conseqüentemente danificando-a. Em meados de 1994, sistemas de ar condicionado automotivos substituíram o uso do R-22 pelo R-124a, um gás refrigerante ecológico inofensivo à camada de ozônio. Devido a um potencial de aquecimento global 1800 vezes maior que o CO_2 o R-22 está em processo de descontinuidade de uso com previsão de total substituição até o ano de 2020 (MILLER; MILLER, 2008).

2.2.3 Resfriamento evaporativo adiabático

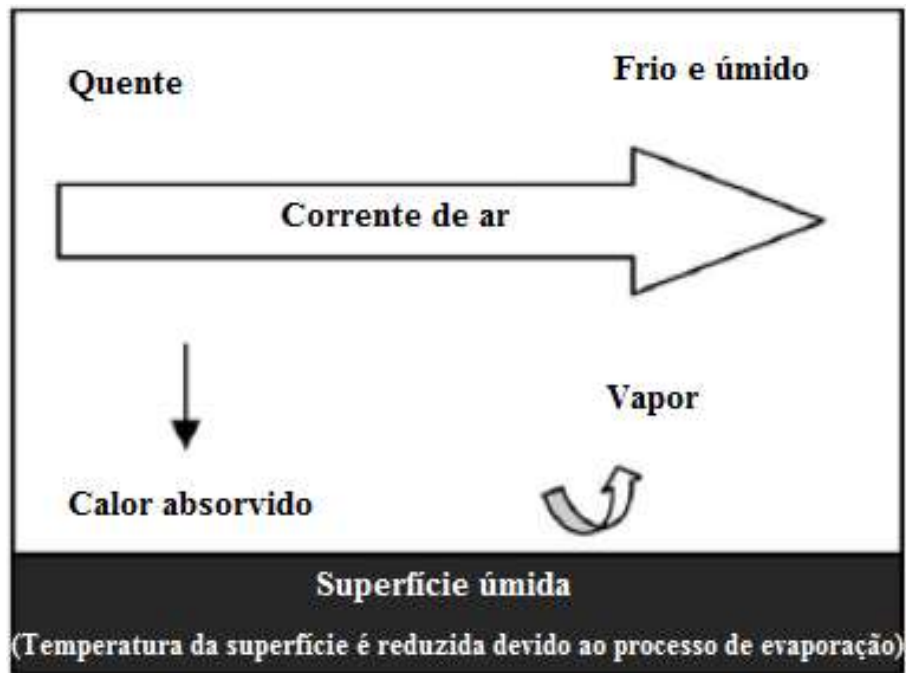
Ao contrário dos aparelhos de ar-condicionado que funcionam a base de ciclos de potência e com alto consumo de energia, no resfriamento evaporativo adiabático, por outro lado, a climatização do ambiente é feita através da absorção de calor do ar da vizinhança. Neste tipo de climatização, portanto, utiliza-se o calor ambiente para evaporar a água do processo conferindo abaixamento da temperatura do ar. O emprego desta tecnologia é mais bem observado em regiões que possuem clima seco, onde não apenas consegue-se obter resultados melhores com maior abaixamento de temperatura como também com o aumento da umidade relativa, sendo uma alternativa mais econômica do ponto de vista financeiro e energético em relação ao ar condicionado. Entretanto, ao contrário de aparelhos de ar condicionado nos quais se consegue controlar os parâmetros de forma a fornecer as condições desejadas, este tipo de aparelho apresenta certas limitações como, por exemplo, difícil controle da umidade relativa e abaixamento máximo da temperatura limitada à temperatura de bulbo úmido (TBU).

2.2.3.1 Princípios físicos e de funcionamento

2.2.3.1.1 Resfriamento evaporativo direto – *Direct evaporative cooling (DEC)*

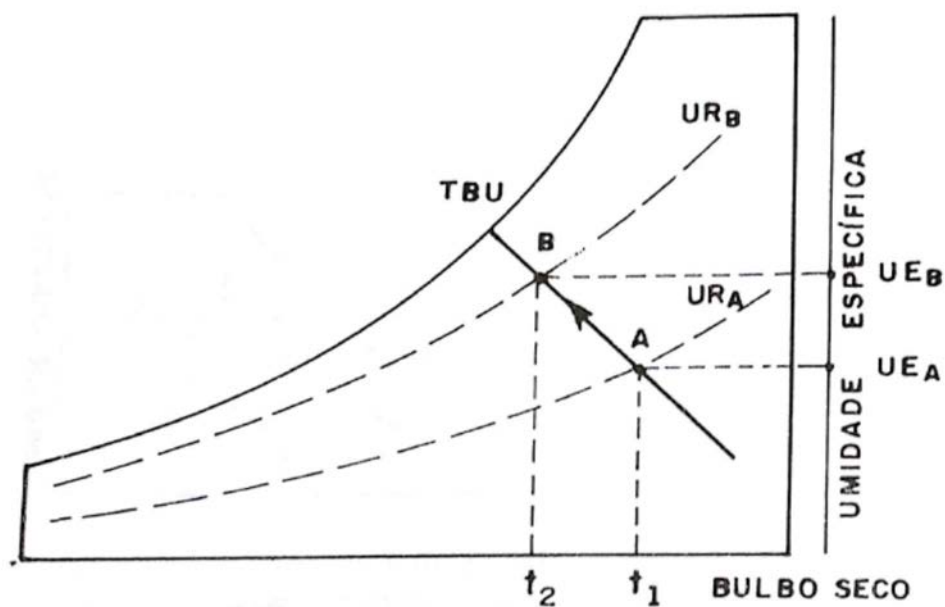
Neste método de resfriamento, tem-se a conversão de calor sensível para calor latente. A corrente de ar, ao passar por um meio úmido, transfere energia a água de modo a vaporizá-la. Essa perda energética, portanto, confere o resfriamento do ar, como ilustrado na Figura 9 do processo direto. Outro modo de se visualizar o processo é através das cartas psicrométricas (gráficos que correlacionam as propriedades do ar), que fornecem uma boa visualização gráfica deste fenômeno. Na Figura 10, a seta indica o sentido de ocorrência, na qual se diminui a temperatura de T_1 para T_2 com conseqüente aumento da umidade relativa de UR_A para UR_B (devido à adição de vapor de água), sendo todo este processo denominado adiabático, pois ocorre a uma entalpia constante. Vale a pena observar que a temperatura de bulbo úmido (TBU), conforme dito anteriormente, é a mínima temperatura que o processo de resfriamento pode alcançar.

Figura 9 - Resfriamento evaporativo direto



Fonte: (CHAN; RIFFAT; ZHU, 2010).

Figura 10 - Resfriamento evaporativo direto – carta psicométrica



Fonte: (MACINTYRE, 2002).

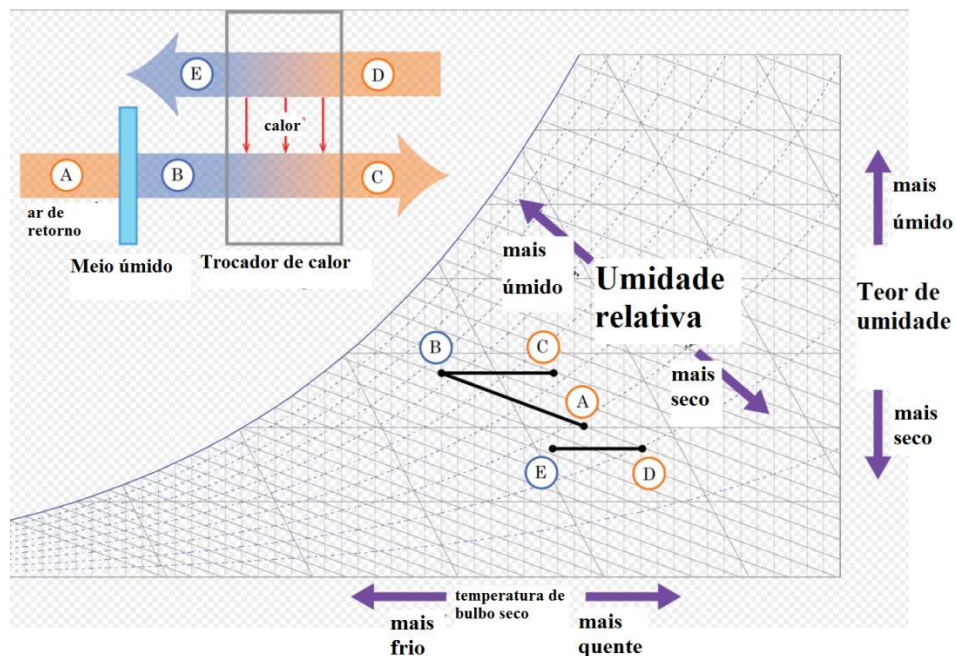
Este fenômeno pode ser observado e comparado com a sudorese. O corpo humano, ao atingir uma temperatura acima do ideal, inicia a produção de uma secreção (suor) que irá

promover um abaixamento da temperatura corporal conforme sua taxa de evaporação. Vale lembrar que esta taxa de evaporação varia conforme a temperatura e umidade, sendo observado que em dias úmidos e quentes o suor se acumula com baixa taxa de evaporação, causando a sensação de desconforto. Chan, Riffat e Zhu (2010) afirma que, para situações onde há a necessidade, pode-se adicionar um desumidificador por processo dissecante de forma a melhorar a eficiência do resfriamento e fornecer um ar de menor umidade relativa.

2.2.3.1.2 Resfriamento evaporativo indireto – *Indirect evaporative cooling (IEC)*

Neste processo, trabalha-se com duas correntes de ar distintas acopladas a um trocador de calor, mantendo-se uma do lado úmido e outra do lado seco. Conforme observado na Figura 11, a corrente de ar do lado úmido sofre um resfriamento evaporativo direto (processos A-B) e se aquece após passagem pelo trocador (fase C) devido à extração do calor da corrente seca (processo D-E), logo, refrigerando o ar para utilização em ambientes ou processos (fase E). No IEC, ao contrário do DEC, pode-se observar na carta psicométrica que a corrente de interesse não apresenta ganho de umidade, daí a denominação “seca”.

Figura 11 - Resfriamento evaporativo indireto



Fonte: (WIKIPEDIA, 2015)

Atualmente, utiliza-se de forma predominante o resfriamento evaporativo direto, em detrimento ao indireto por ser um aparelho simplificado e não requerer mudanças estruturais

nas edificações. Dentre as diversas formas de equipamentos que fornecem a aplicação prática deste princípio, dois dos mais comuns modelos comercializados atualmente são:

- Célula evaporativa

Composto basicamente de ventilador, bomba d'água e uma membrana permeável de considerável área, o abaixamento da temperatura ambiente se dará pela passagem do ar através da membrana previamente encharcada com o auxílio da bomba onde o ar irá evaporar a água baixando sua temperatura. Deve-se atentar para uma manutenção periódica devido à utilização de água da rede onde os minerais aos poucos deterioram a membrana, com perda da eficácia.

- Climatizador aspersor

Neste tipo de dispositivo, uma fina névoa de água é adicionada ao ar com o auxílio de um ventilador e um dispositivo aspersor. Energia proveniente do ar será então utilizada para evaporar a água aspergida diminuindo, portanto, sua temperatura.

Apesar de apresentar menor investimento de capital, menor taxa de manutenção e consumo de energia elétrica para funcionamento em relação à instalação de ar condicionado, este tipo de aparelho requer constante atenção devido à possibilidade de proliferação da bactéria *legionella*. Esta bactéria causa a chamada doença do legionário, causando uma pneumonia atípica ou uma forma mais branda de infecção chamada de Febre de Pontiac, sendo prontamente identificada por manchas de cor prata. Por este motivo, a proliferação desta bactéria em climatizadores evaporativos, potencializada pela ampla circulação de ar no ambiente, contamina seus frequentadores e deve ser combatida com manutenção periódica através de esterilização. Em geral, a faixa de temperaturas que promovem a desinfecção do reservatório e tubos variam entre 60 e 70 graus celsius (RIVERA et al., 2007).

2.3 OUTRAS TECNOLOGIAS

Nestes tópicos serão abordadas outras tecnologias alternativas às convencionais para refrigeração e sustentabilidade de edificações.

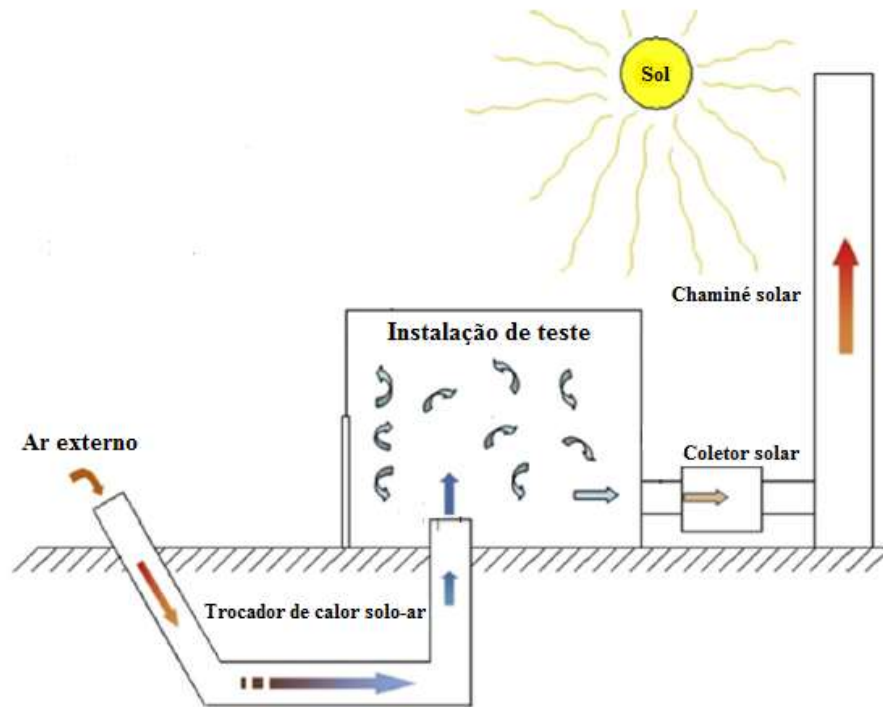
2.3.1 Trocadores de calor acoplados ao solo – *Ground-coupled Heat Exchanger (GCHX)*

São trocadores de calor instalados no subterrâneo de modo que possam capturar ou dissipar calor para o solo. Isto acontece, pois, a técnica utiliza a quase constante temperatura da terra para resfriar ou aquecer o ar ou outros fluídos. Dentre os diversos modelos de *GCHX*, os trocadores de calor solo-ar, em inglês *Earth-to-air heat exchanger (EAHE)*, promovem a troca térmica entre uma corrente de ar e o solo, com o propósito de aquecê-lo ou resfriá-lo, dependendo das condições externas, para promover a ventilação de ambientes agrícolas, residenciais ou industriais (YU et al., 2014). De acordo com Santamouris et al. (1995), *EAHE* tem sido utilizado por instalações agrícolas e casas-verde nos Estados Unidos a vários anos.

Esta tecnologia deve ser amplamente difundida em termos de arquitetura sustentável, onde desempenha um importante papel ao fornecer ar refrigerado durante dias de intenso calor. Além disso, os tubos são uma alternativa economicamente viável em relação às centrais de ar condicionado, com significativo decréscimo no consumo de energia, pois utilizam apenas um ventilador para movimentar o ar, excluindo-se os compressores. A Figura 12 fornece um exemplo de aplicação do *EAHE* em conjunto com o uso de uma chaminé solar. Observa-se a admissão do ar do ambiente externo sendo conduzido para o trocador de calor subterrâneo, onde se resfria para ser conduzido e utilizado em um ambiente. Após se aquecer dentro do ambiente, tornando-se menos denso, é conduzido pela chaminé solar ao ambiente externo.

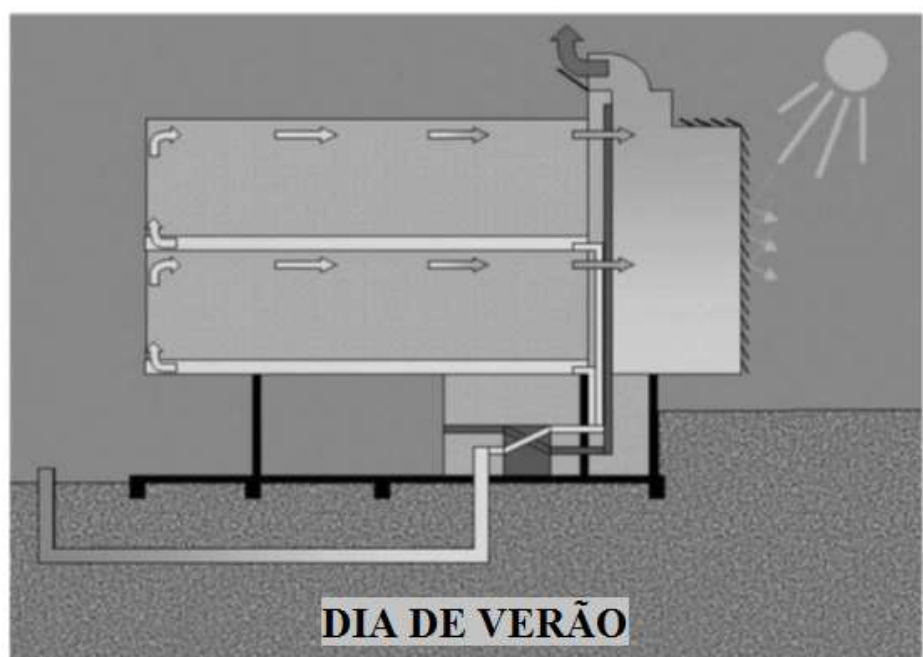
Um exemplo de aplicação desta técnica é descrita no trabalho de Breesch, Bossaer e Janssens (2005) onde o edifício de baixo consumo de energia '*SD Worx*' localizado em Kortrijk (Bélgica) utiliza *EAHE* para aquecer o ar durante o inverno combinado com um trocador de calor regenerativo que pré-aquece o ar insuflado. No verão, o processo se inverte utilizando-se da técnica para resfriar o ar fornecido durante o dia (Figura 13) e, durante a noite, há o emprego de outra técnica de resfriamento denominada ventilação noturna, onde há dissipação, através da ventilação natural, do calor retido durante o dia pela alvenaria da edificação. Com o auxílio de aletas posicionadas entre os pisos e laje, permite-se a entrada de um escoamento de ar que promove a retirada de calor destinando-o para uma chaminé solar que irá dissipar para o meio exterior (Figura 14).

Figura 12 - Aplicação dos tubos resfriadores subterrâneos



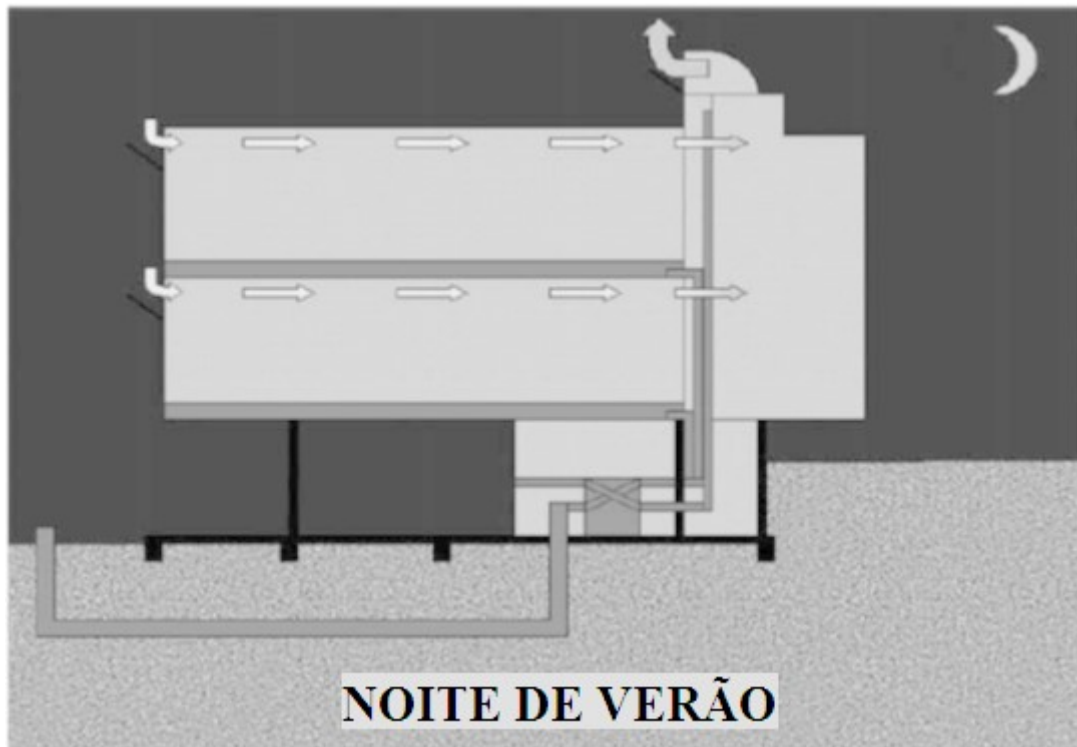
Fonte: (YU et al., 2014).

Figura 13 - Esquema de operação de um EAHE no SD Worx



Fonte: (BREESCH; BOSSAER; JANSSENS, 2005).

Figura 14 - Esquema de operação da ventilação natural noturna no SD Worx



Fonte: (BREESCH; BOSSAER; JANSSENS, 2005).

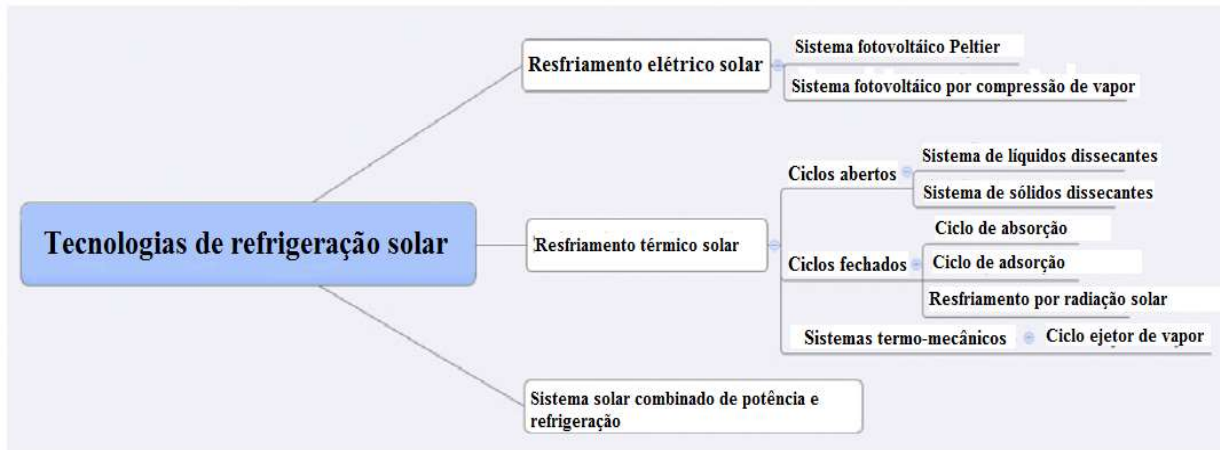
2.3.2 Ar condicionado solar

De 2010 a 2035, segundo a *Internal Energy Agency (2012)*, haverá um aumento no consumo de energia mundial da ordem de 35 por cento. Sabe-se que este aumento está relacionado ao crescimento populacional e econômico, em especial nos países em desenvolvimento, acarretando não apenas em dificuldades de geração como aumento das emissões de gases estufas provocando o aumento na temperatura global. Neste contexto, para suprir o aumento do consumo energético dentro do mesmo período, prevê-se um acréscimo do uso de energia de fontes renováveis alcançando até 31 por cento da geração e evitando-se, portanto, a queima de combustíveis fósseis.

Visando esta substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, aparelhos de resfriamento que utilizam energia térmica proveniente do sol tem se mostrado uma boa alternativa. De acordo com a Figura 15, tecnologias de resfriamento solar podem ser agrupadas em três diferentes grupos de acordo com seu princípio de funcionamento. Primeiramente utilizando a energia solar convertendo-a em elétrica através de painéis fotovoltaicos para posterior utilização em sistemas de compressão de vapor e Peltier; ainda,

utiliza-se a energia térmica para resfriamento através de diferentes ciclos; por fim, o sistema combinado de potência e refrigeração.

Figura 15 – Classificação das tecnologias de resfriamento solar

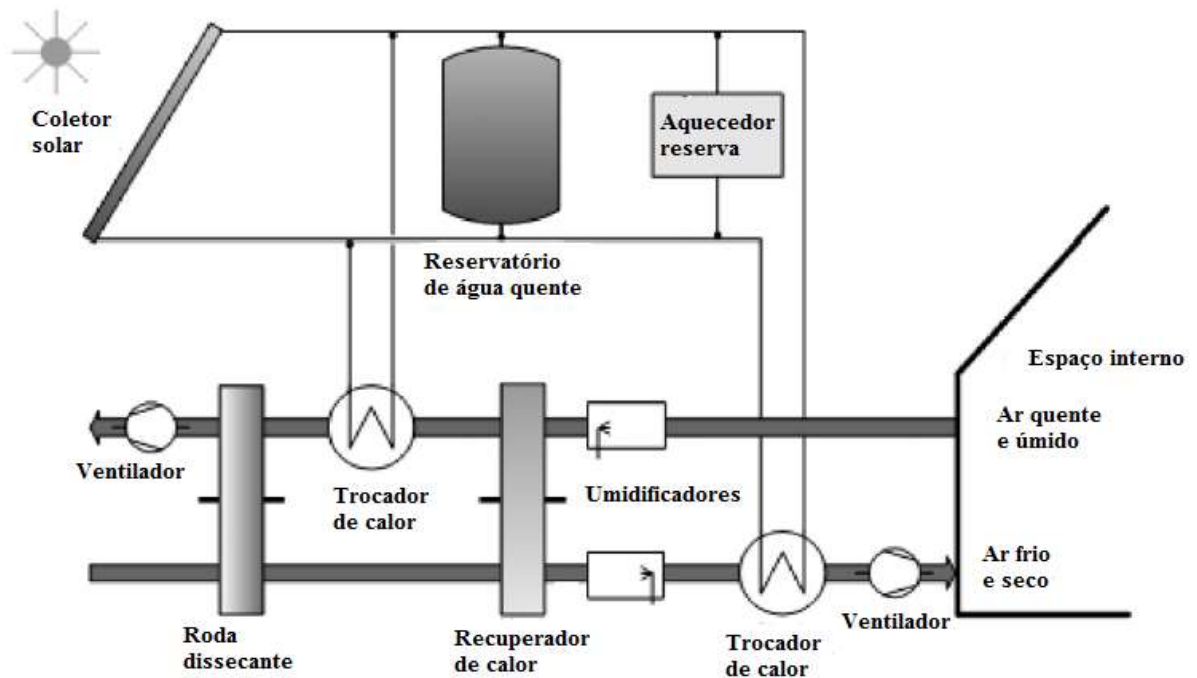


Fonte: (AL-ALILI; HWANG; RADERMACHER, 2014).

No presente estudo são descritas as tecnologias mais utilizadas em ciclos abertos e fechados, ou seja, materiais dessecantes e ciclos de absorção, respectivamente.

Para o sistema de materiais dessecantes, a função principal é diminuir a umidade do ar que será utilizado para o fornecimento ao ambiente. O processo de desumidificação por sólidos dessecantes, por exemplo, em geral é combinada com o processo de resfriamento evaporativo conferindo não apenas a diminuição da umidade como também da temperatura. A Figura 16 representa uma configuração possível de uma instalação de ar-condicionado solar. Neste esquema, a roda contendo um elemento dessecante consiste de uma colmeia ou material corrugado que tem a função de reter a umidade da corrente de ar a ser fornecida ao ambiente e, conforme gira de encontro à corrente contrária, evapora a umidade coletada. Observa-se ainda o emprego do resfriamento adiabático, onde irá diminuir a temperatura do ar mantendo a baixa umidade.

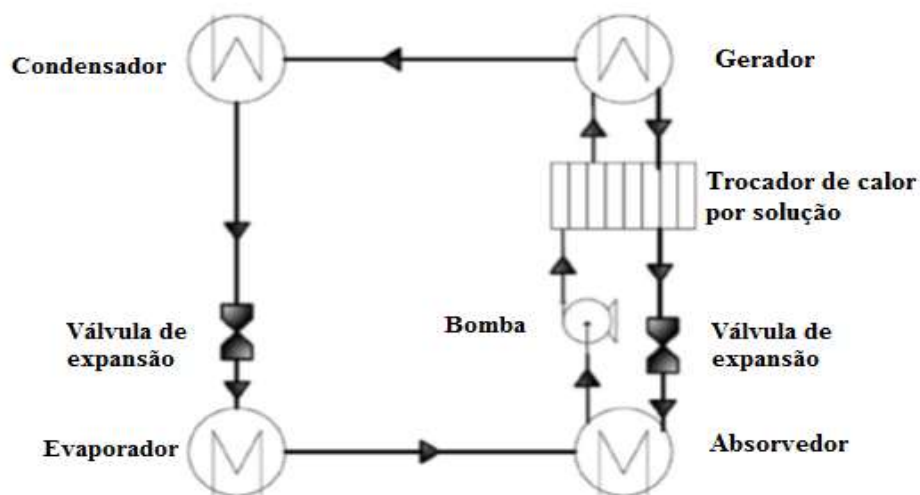
Figura 16 - Ciclo de refrigeração utilizando material sólido dessecante



Fonte: (AL-ALILI; HWANG; RADERMACHER, 2014).

O ciclo fechado de absorção, por outro lado, se assemelha aquele promovido pela compressão de vapor, exceto pelo fato do compressor utilizado ser térmico em detrimento ao de vapor. O compressor térmico, conforme a Figura 17, consiste de um absorvedor, gerador e uma solução.

Figura 17 - Esquema de ciclo de absorção de simples estágio



Fonte:(AL-ALILI; HWANG; RADERMACHER, 2014).

Em seu estudo sobre a aplicação desta tecnologia no Marrocos, Allouhi et al. (2015) afirma que haveria enorme economia de energia e mitigação dos problemas relacionados a emissão de gases estufa provenientes do uso de sistemas convencionais de ar condicionado. Por outro lado, atenta para o fato do alto investimento necessário para implantar esta tecnologia gerando, portanto, alto tempo de *payback*. Logo, para uma ampla utilização desta tecnologia, há a necessidade de investir em seu desenvolvimento que, apesar de grande potencial, ainda apresenta uma performance muito abaixo dos aparelhos convencionais. Além disso, há a necessidade de diminuir o investimento inicial e conscientizar futuros consumidores de que, embora sendo uma tecnologia mais complexa de se operar, a economia futura pode valer a pena.

2.3.3 Arquitetura sustentável

De acordo com a norma ISO 15392 (2008), o desenvolvimento sustentável das edificações e outras construções requerem um nível de desempenho e funcionalidade gerando o mínimo de impacto ambiental, fornecendo melhoras nos aspectos econômicos, sociais e culturais em níveis locais, regionais e até mesmo globais.

Para Ju, Ning e Pan (2016), a arquitetura sustentável se apresenta como uma alternativa de edificação que se propõe a reduzir o consumo de energia, água, rejeitos sólidos, gases estufa e outros problemas ambientais melhorando sua eficiência. Além disso, De Boeck et al. (2015) afirma que a necessidade de melhora do desempenho das edificações se deve ao fato do constante aumento das emissões de gases estufa, subindo aproximadamente 52% entre o período de 2005 a 2050. Esta melhora e controle das emissões, como sugere o autor, pode ser alcançada sem comprometer o bem-estar do indivíduo.

Diversas técnicas são usadas para melhorar o desempenho das edificações utilizando equipamentos de baixo consumo energético ou realizando mudanças no projeto arquitetônico das edificações. Manzano-Agugliaro et al. (2015) em seu estudo, lista uma série de modificações passíveis de serem realizadas. Dentre características relacionadas a controle de temperatura e melhora de conforto térmico, destacam-se:

- 1- Aquecimento solar passivo: quando se utiliza elementos arquitetônicos que permitem a manutenção do calor proveniente da radiação solar exclusivamente, sendo a energia

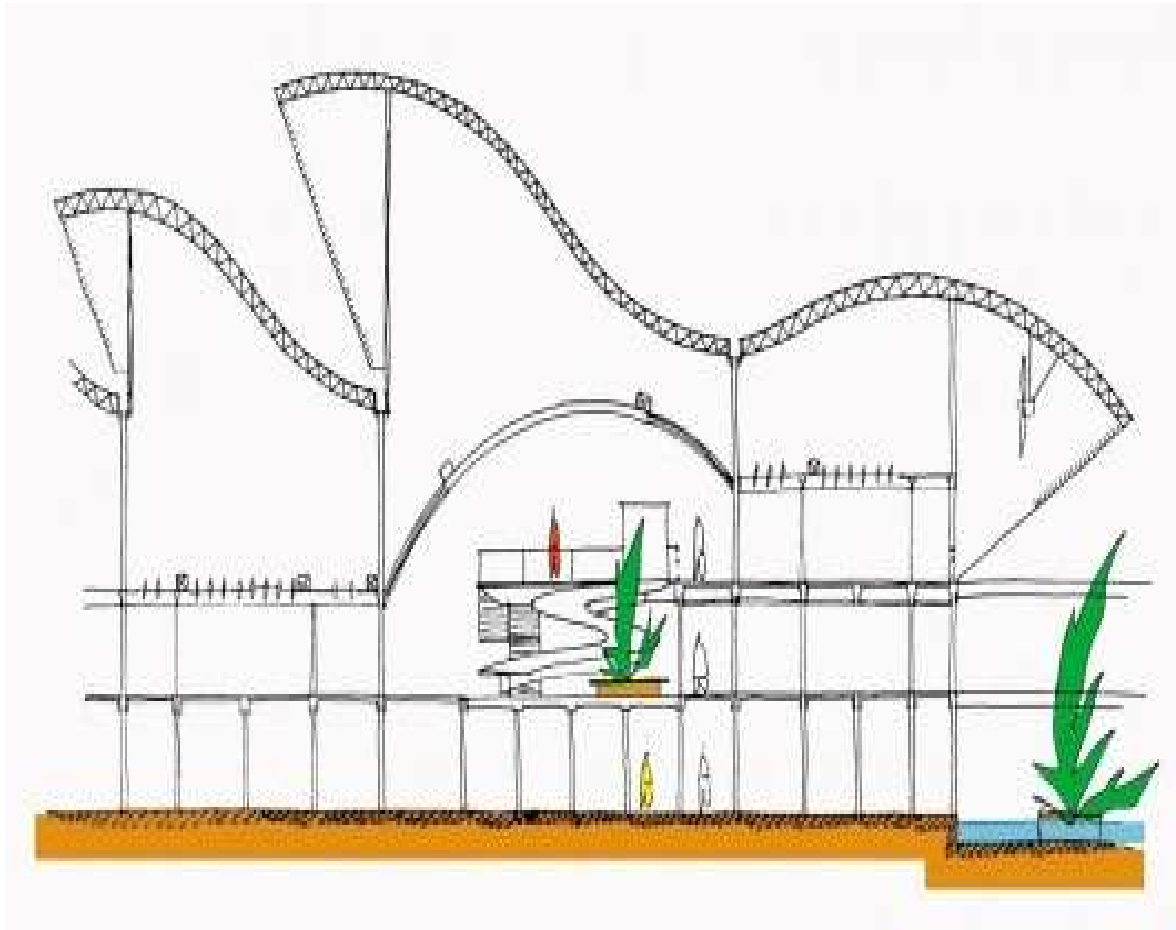
distribuída a outras aplicações quando conveniente. O modo de se capturar a energia pode ser realizado de diversas formas, utilizando-se o solo, paredes, teto e aberturas.

- 2- Aquecimento solar ativo: o calor proveniente do sol é utilizado para aquecer um fluido que posteriormente será utilizado com o mesmo propósito de aquecimento interno. Neste caso, entretanto, utiliza-se uma pequena quantidade de energia para promover sua distribuição.
- 3- Umidificação do ambiente: esta técnica tem como objetivo o elevar a umidade relativa através do movimento do ar por uma lamina de água. Um dos modos de se promover este aumento é através da presença de vegetação na vizinhança ou dentro da edificação, pátios com vegetação, presença de fontes de água, uso de tubos subterrâneos completos com certa quantidade de água em seu interior, cobertura vegetal (telhado verde), spray de água no telhado e no interior;
- 4- Proteção solar: procura evitar o ganho de calor por radiação solar para o interior da edificação evitando, conseqüentemente, um acréscimo de temperatura. Árvores e vegetação de decíduas são utilizadas com o intuito de bloqueio dos raios solares durante o verão, permitindo sua entrada durante o inverno devido à queda de suas folhas. Além disso, podem-se utilizar alpendres, toldos e persianas.
- 5- Resfriamento através de ventilação natural ou forçada: como já descrito neste texto, pode ser alcançada através da ventilação cruzada a favor dos ventos dominantes, através do efeito chaminé, câmara solar, ventilação subterrânea, torre de vento, torre de evaporação, dentre outros.
- 6- Desumidificação convencional: em ambientes de alta umidade relativa, visa através do uso de materiais dessecantes sua diminuição. O uso desta técnica por si só não garante melhora de conforto térmico, sendo necessária a adição de algum outro recurso.

Estas são algumas das técnicas que resumem o uso de elementos arquitetônicos para aplicação em uma edificação sustentável quando se busca conforto térmico, seja para ambientes que exigem aquecimento ou resfriamento. Um exemplo que engloba algumas destas técnicas pode ser observado no projeto do hospital 'Sara Kubitschek' em Salvador – Bahia com a assinatura do arquiteto João Filgueiras. A Figura 18 ilustra, através de um desenho artístico, o interior do hospital. Nela, podem-se observar o uso de formas diferenciadas nos *sheds* do telhado, que facilitam a permeabilidade da ventilação natural, a presença de uma fonte d'água que serve de lâmina de água para o aumento da umidade

relativa e ainda a presença de vegetação, tanto no interior (utilizando-se um pátio) quanto no exterior.

Figura 18 – Exemplo de edificação sustentável - Hospital Sara Kubitscheck, Salvador.



Fonte: (LIMA, 2012).

3 INSTRUMENTAÇÃO E NORMAS

3.1 INTRODUÇÃO

Este tópico se dedica a abordagem da instrumentação utilizada para mensurar índices de conforto térmico bem como uma breve descrição das normas que definem parâmetros ideais quando da sua avaliação.

3.2 INSTRUMENTOS

De acordo com Ashrae Handbook: Fundamentals (1989), medidas para a avaliação de índices de conforto térmico se tornaram necessárias a partir do momento em que sistemas de aquecimento e ar-condicionado foram instalados para este propósito. Tais medições são importantes, pois podem prever as sensações térmicas e com o auxílio de tabelas, fornecem as ferramentas necessárias para calcular diversos índices como, por exemplo, o PMV e, além disso, sua combinação permite prever outros valores. O guia aborda, para fins de conforto térmico, medições de temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante, e umidade do ar.

- Temperatura do ar – medida com diversos tipos de termômetro, seus sensores registram uma média entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante. Sendo, neste caso, apenas a temperatura do ar relevante, um dos modos de se reduzir o erro causado pelo fator radiante é diminuir os sensores ao máximo possível assim, o coeficiente de troca de calor radiante se mantém constante enquanto o coeficiente de transferência de calor convectivo é aumentado conforme se diminui o sensor. Além disso, pode-se utilizar um revestimento cilíndrico de alumínio polido em torno do sensor.
- Velocidade do ar – Utilizam-se anemômetros para avaliar a velocidade de um fluxo de ar. Para velocidades baixas, utilizam-se anemômetros térmicos. Como a direção da corrente de ar não interfere no conforto térmico, não há a necessidade de se avaliar tal variável, entretanto, para estimar uma direção principal pode-se utilizar um teste de fumaça.
- Temperatura média radiante – Pode ser obtida de duas maneiras. Primeiramente, pode-se medir a temperatura das superfícies dos arredores e determinar os fatores de

ângulos a partir de diagramas existentes, porém, este meio é de difícil avaliação e com grande gasto de tempo. O meio mais usual é se utilizar um termômetro de globo de Vernon.

- Umidade do ar – Devido a ser uniforme no ambiente, dispensa a medição em pontos variados e pode ser obtida por meio de higrômetros (elétricos, eletrolíticos, gravimétricos).

3.3 NORMAS

3.3.1 ASHRAE Standard 55

A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, fundada em 1894 é uma entidade focada em sistemas de construção, eficiência energética, qualidade de ar interno e sustentabilidade. Embora estabelecida nos Estados Unidos, tem caráter internacional e possui dentre suas principais atividades a organização de feiras que abordam os assuntos pertinentes, a publicação anual de guias relacionados a problemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) e por fim uma gama de padrões mundialmente reconhecidos para HVAC. No que se refere ao conforto térmico em ambientes ocupados, o padrão estabelecido é o de número 55 ou *Standard 55* (ASHRAE, 2004).

Em sua última edição publicada em 2013, a norma se apresenta dividida em oito seções e dois apêndices da seguinte forma:

- 1- Propósito
- 2- Escopo
- 3- Definições
- 4- Exigências gerais
- 5- Condições que promovem o conforto térmico
- 6- Conformidade do projeto
- 7- Avaliação de conforto em edificações existentes
- 8- Referências

Apêndice A: Métodos para determinação da temperatura de funcionamento

Apêndice B: Programas computacionais para cálculo de PMV/PPD

Atualmente, a norma se baseia na modificação feita em 2004 a partir da adição de dois modelos de avaliação de conforto térmico: o modelo analítico PMV/PPD de Fanger e o modelo empírico de conforto adaptativo.

3.3.2 ISO 7730:2005

A *International Organization for Standardization (ISO)* é uma organização internacional não governamental que reúne especialistas de diversas áreas para, de modo voluntário, compartilhar conhecimento e desenvolver padrões internacionais que atendam as inovações e forneçam soluções aos desafios globais. Iniciada por meio de um encontro no Instituto de Engenheiros Civis em Londres, um corpo de delegados de 25 países diferentes criou a instituição com o propósito de facilitar e unificar os padrões industriais. Atualmente a entidade conta com membros de 162 países com sua matriz estabelecida em Genebra, na Suíça.

Dentre os mais de 20.500 padrões internacionais por ela desenvolvida, cobrindo quase todos os aspectos da tecnologia e manufatura, a norma ISO 7730 (2005) – Ergonomia do ambiente térmico – desenvolvida em paralelo com a ASHRAE standard 55 revisada, compõe um conjunto de documentos que apresenta meios de se avaliar e mensurar a sensação térmica e o grau de desconforto causado pela temperatura de pessoas quando expostas a ambientes moderados. A partir do cálculo analítico do PMV e PPD bem como conforto térmico local, pode-se avaliar em quais condições se encontra o ambiente e se o mesmo se apresenta aceitável ou em representa desconforto.

A norma em sua última revisão no ano de 2015 apresenta a seguinte configuração:

- 1- Escopo
- 2- Referências normativas
- 3- Termos e definições
- 4- Voto médio estimado (PMV)
- 5- Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)
- 6- Desconforto térmico local
- 7- Ambientes térmicos aceitáveis para conforto

- 8- Ambientes térmicos não uniformes
- 9- Avaliação de longo prazo das condições gerais de conforto térmico
- 10- Adaptação

Anexo A – Exemplos de exigências de conforto térmico para diferentes categorias

Anexo B – Taxas metabólicas de diferentes tipos de atividades

Anexo C – Estimativa de isolamento térmico para roupas

Anexo D – Programa computacional para o cálculo do PMV e PPD

Anexo E – Tabelas para determinação do PMV

Anexo F – Umidade

Anexo G – Velocidade do ar

Anexo H – Avaliação de longo prazo das condições gerais de conforto térmico

O conjunto de anexos oferece uma gama de tabelas que permitem avaliar as diversas variáveis de influência com o intuito de estimar a carga térmica gerada em um ambiente, a resistência oferecida pelas roupas para a dissipação do calor, condições do ar, dentre outras de modo que estes possam auxiliar na conclusão e avaliação se o ambiente apresenta níveis aceitáveis de conforto ou não.

3.3.3 EN 15251

Esta norma representa uma das diretrizes criadas pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) com o intuito de implementar uma normativa europeia para o desempenho energético de edificações. O CEN é uma dentre os três institutos europeus de padronização oficialmente reconhecidos pela União Europeia e pela Associação de Livre Comércio da Europa e se caracteriza por ser uma organização sem fins lucrativos que se propõe a desenvolver os padrões europeus e documentos técnicos relacionados a vários tipos de produtos, materiais, serviços e processos. Dentre os diversos campos de atuação, pode-se citar: química, construção, defesa e segurança, energia, meio ambiente, maquinários, dentre outros.

Em relação à norma EN 15251 – “Parâmetros ambientais interiores para a concepção e avaliação do desempenho energético dos edifícios abordando a qualidade do ar interior,

ambiente térmico, iluminação e acústica”, a mesma padroniza valores ideais para serem alcançados em diversas situações de projetos de interiores. A

Tabela 2 categoriza os diferentes tipos de interiores de acordo com a exigência de conforto e necessidade dos frequentadores.

Tabela 2 – Classificação de ambientes de acordo com a norma EN 15251

| Categoria | Explicação |
|------------------|---|
| I | Alto nível de expectativa e é recomendada em espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis com necessidades especiais como deficientes, doentes, crianças muito pequenas e idosos. |
| II | Nível normal de expectativa e deve ser utilizado para construções novas e renovadas. |
| III | Aceitável, nível moderado de expectativa e pode ser utilizado em edifícios existentes. |
| IV | Valores fora dos critérios das categorias anteriores. Esta categoria só deve ser aceita por um período limitado do ano. |

Fonte: Norma EN 15251

Sua configuração atual, datada de 2006, apresenta a seguinte forma de suas seções principais:

- 1- Escopo
- 2- Referências normativas
- 3- Termos e definições
- 4- Símbolos e abreviações
- 5- Interação com outras normas
- 6- Critérios de entrada do projeto para dimensionamento de edifícios, aquecimento, refrigeração e sistemas de ventilação natural e forçada
- 7- Parâmetros em ambientes internos para cálculos de energia
- 8- Avaliação de ambientes internos e indicadores de longo prazo
- 9- Inspeção e medição de ambientes internos em edificações existentes
- 10- Classificação e certificação de um ambiente interno

Anexo A – (informativo) Critérios recomendados para ambientes térmicos

Anexo B – (informativo) Base de critério para qualidade do ar interno e taxas de ventilação

Anexo C – (informativo) Exemplo de como definir edificações de baixa e superbaixa emissão de poluentes

Anexo D – (informativo) Critérios recomendados para iluminação

Anexo E – (informativo) Critérios do sistema de ruído interno de alguns espaços e edificações.

Anexo F – (informativo) Avaliação de longo prazo das condições gerais de conforto térmico

Anexo G – (informativo) Critérios recomendados para desvios aceitáveis

Anexo H – (informativo) Metodologias para avaliações subjuntivas

Anexo I – (informativo) Exemplos de classificação e certificação de ambientes internos

3.3.4 NR-15 – Anexo 3

Esta norma regulamentadora brasileira estabelece limites sobre atividades e operações insalubres. Em particular no anexo 3, trata sobre os limites de tolerância para a exposição ao calor. Para avaliar as condições de exposição, define-se o “índice de bulbo úmido termômetro de globo” ou IBUTG através das equações (2) e (3):

Ambientes internos ou externos sem carga solar:

$$IBUTG = 0,7 tbn + 0,3 tg \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2)$$

Ambientes externos com carga solar:

$$IBUTG = 0,7 tbn + 0,1 tbs + 0,2 tg \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

Sendo:

tbn = temperatura de bulbo úmido natural ($^\circ\text{C}$)

tg = temperatura de globo ($^\circ\text{C}$)

tbs = temperatura de bulbo seco ($^\circ\text{C}$)

Para mensurar os parâmetros citados na equação, utiliza-se um termômetro de bulbo úmido natural, termômetro de globo e um termômetro de mercúrio comum. Depois de calculado o IBUTG, procede-se a Tabela 3 de modo a se comparar o tipo de atividade com o valor calculado e predizer se a exposição ao calor está adequada:

Tabela 3 – Índice IBUTG – NR15-Anexo 3

| REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE COM DESCANSO NO PRÓPRIO LOCAL DE TRABALHO (por hora) | TIPO DE ATIVIDADE | | |
|---|-------------------|---------------|---------------|
| | LEVE | MODERADA | PESADA |
| Trabalho contínuo | até 30,0 | até 26,7 | até 25,0 |
| 45 minutos trabalho 15 minutos descanso | 30,1 a 30,5 | 26,8 a 28,0 | 25,1 a 25,9 |
| 30 minutos trabalho 30 minutos descanso | 30,7 a 31,4 | 28,1 a 29,4 | 26,0 a 27,9 |
| 15 minutos trabalho 45 minutos descanso | 31,5 a 32,2 | 29,5 a 31,1 | 28,0 a 30,0 |
| Não é permitido o trabalho, sem a adoção de medidas adequadas de controle | acima de 32,2 | acima de 31,1 | acima de 30,0 |

Fonte: – NR15-Anexo 3

4 ESTUDO DE CASO

Definidos os conceitos, tecnologias, instrumentação e normas que abrangem a ventilação de edificações e em especial à ventilação industrial, o presente trabalho aborda um estudo de caso com aplicação em uma situação real. Os conceitos e princípios serão aplicados em torno da melhora da ventilação industrial de uma empresa de equipamentos e componentes aeronáuticos.

4.1 INFORMAÇÕES GERAIS

A planta industrial se localiza no vale do Paraíba, cidade de Guaratinguetá – SP na coordenada geográfica aproximada de 22°46'25'' Sul 46°08'25'' Norte a uma altitude de aproximadamente 545 metros em relação ao nível do mar (GOOGLE EARTH, 2015), sobre influência do clima subtropical quente, com média de temperaturas na região de 21 °C e umidade relativa superior a 70% (INPE, 2012).

4.2 OBJETIVOS DO PROJETO

Visam a melhora dos índices de calor e conforto térmico das áreas de produção, montagem mecânica (produtivas) e almoxarifado.

4.3 DESCRIÇÕES DO PROJETO

4.3.1 Características construtivas básicas da edificação

O galpão industrial construído em uma área total de aproximadamente 8.000 m² foi projetado no modelo de duas águas com cobertura em estrutura metálica (vigas e terças) e telhas sanduíche (com isolante termo acústico interno em lã de rocha). Para o fechamento lateral, a estrutura apresenta sustentação por pilares e terças metálicas utilizando telhas metálicas do tipo sanduíche (com isolante termo acústico interno em lã de rocha) que completam o revestimento do edifício e finalmente, revestimento das paredes internas “corta-fogo” e marquises.

4.3.2 Sistema inicial de ventilação

O atual sistema de ventilação da planta é composto de dutos para insuflamento de ar, lanternins e portas (aberturas) caracterizando, portanto, admissão natural e insuflação mecânica de ar com exaustão natural.

Na área de produção e ajustagem mecânica, o ar é fornecido através de uma rede de dutos conectada a uma unidade de ar e um total de quinze sopradores localizados a aproximadamente três metros em relação ao piso. A rede de dutos originária da unidade de ar se divide em três ramos principais de modo a cobrirem a maior parte do salão, observa-se ainda que cada ramo contém cinco sopradores sendo três com o sopro direcionado de encontro ao lanternim e dois no sentido oposto, como observado na Figura 19.

Em relação à unidade de ar responsável pela admissão e posterior insuflamento na área, a mesma é composta de um sistema de filtros e serpentinas caracterizando, portanto, um trocador de calor entre o ar e a água gelada provenientes de um *chiller*, apesar de o sistema se encontrar desativado atualmente. Vale ainda ressaltar que a unidade se localiza na chamada ‘área de utilidades’ ou ‘laje técnica’, onde, além dela, se localizam condensadores dos aparelhos de ar condicionado que atendem áreas administrativas, metrologia, manutenção (total de sete) e um exaustor da área, gerando, portanto, uma alta carga térmica também na área de admissão.

A Figura 19 descreve os seguintes componentes:

- 1- Unidade fornecedora de ar para ventilação;
- 2- Representação de um soprador (total de quinze);
- 3- Ramificação de um duto originário da unidade de ar;
- 4- Projeção do lanternim da área;
- 5- Entradas de ventilação natural.

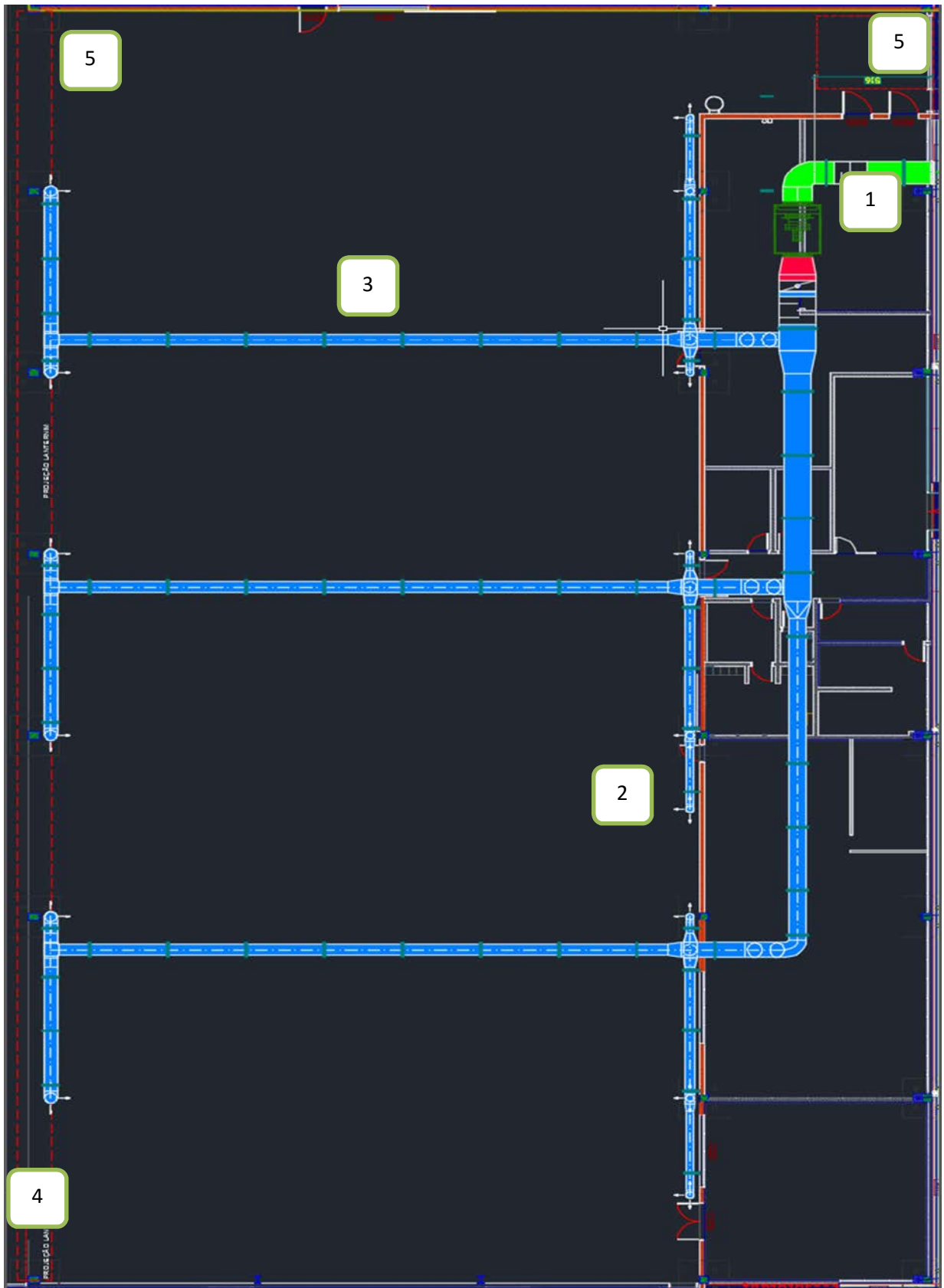
Para a montagem, o fornecimento de ar é realizado por uma segunda unidade de menor porte conectada a uma tubulação que se estende até o setor de almoxarifado totalizando quatro sopradores também posicionados a aproximadamente três metros em relação ao piso. Além disso, a segunda unidade de ar se localiza na laje das baias de resíduos e à sombra, sem nenhuma outra fonte geradora de calor nas proximidades. Desta forma, através de medições, constatou-se que a admissão de ar é feita em menor temperatura e, somando-se o fato de que a

área apresenta menor número de pessoas e máquinas, portanto, menor carga térmica, caracteriza-se por ser um setor mais arejado em relação à produção. A Figura 20 descreve os seguintes componentes da área:

- 1- Unidade fornecedora de ar para ventilação;
- 2- Representação de um soprador (total de quatro);
- 3- Projeção do lanternim da montagem;
- 4- Projeção do lanternim do almoxarifado;
- 5- Entrada de ventilação natural.

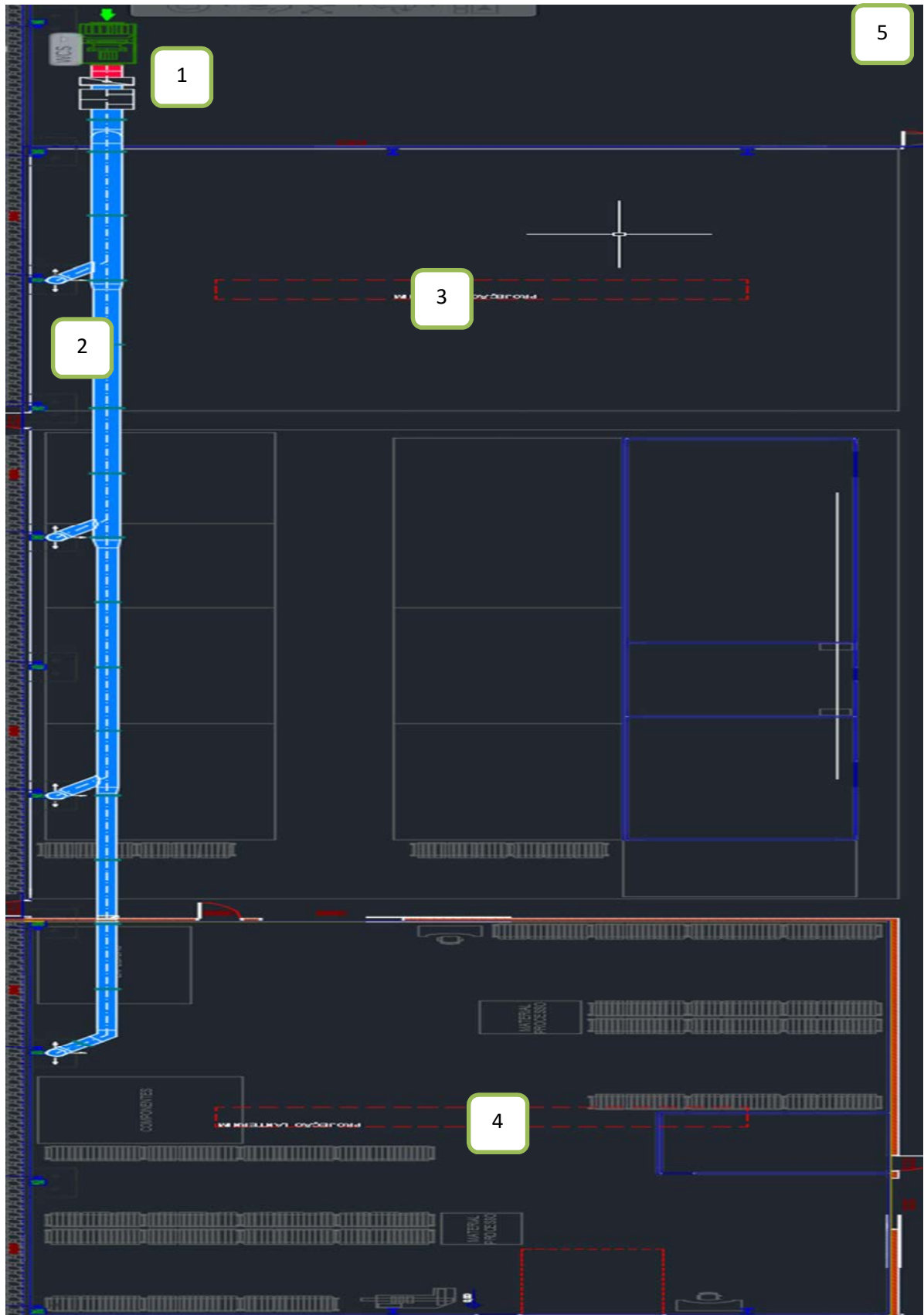
Há ainda outro lanternim localizado no setor de almoxarifado com portas funcionando para a admissão de ar. Nesta área, foi constatada através de medições e *feedback* dos próprios funcionários uma temperatura ideal para realização das atividades concluindo-se posteriormente a correta utilização da ventilação natural sendo, portanto, desnecessário qualquer ação de melhorias.

Figura 19 - Layout dos dutos da área de produção



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Layout dos dutos da área de montagem mecânica



Fonte: Autoria própria.

4.4 METODOLOGIA

Considerando a situação atual da matriz energética brasileira e o compromisso de ser uma empresa a atuar de forma ambientalmente responsável, visto a certificação ISO14001, todo o projeto foi desenvolvido em torno de se identificar pontos de melhorias, de forma a utilizar as tecnologias já existentes na própria planta e, caso necessário, com a adição de equipamentos de baixo consumo de energia, preferencialmente. Portanto, focando em sistemas de ventilação forçada e natural evitando-se instalações de ar condicionado, onde haveria alto investimento de capital e aumento considerável no consumo energético.

- Produção

Caracterizada por ser a área mais quente da planta industrial, como se pôde constatar através de medições realizadas com termômetro de globo e também pela averiguação juntamente aos funcionários que, ao trabalharem submetidos ao calor excessivo, apresentam queda de produtividade, desconforto e insatisfação.

Além disto, esta é a principal área motivadora e a grande responsável pelo desenvolvimento deste projeto devido a, neste setor, se apresentarem a maior concentração de trabalhadores fixos e pessoas circulando sendo, portanto, submetidas a este calor. Devido à área apresentar a maior carga térmica gerada (iluminação, pessoas, máquinas, infiltrações, dentre outros) e de grande obstrução à permeabilidade da ventilação natural (devido ao grande número de máquinas), o problema nesta área tem uma elevada complexidade em relação às demais sendo, portanto, necessário recorrer a recursos de ventilação forçada.

Baseado na localização dos centros de usinagem na planta e a atual configuração do conjunto dutos e lanternim na área como descrito no layout da Figura 19 e Figura 20, foram identificados os seguintes problemas:

- 1 – Ventilação natural ineficaz;
- 2 – Sopradores elevados em relação ao piso;
- 3 – Posicionamento incorreto do lanternim;
- 4 – Formação de uma cortina de ar;
- 5 – Vazão abaixo da requerida;
- 6 – Regiões de estagnação.

- Montagem

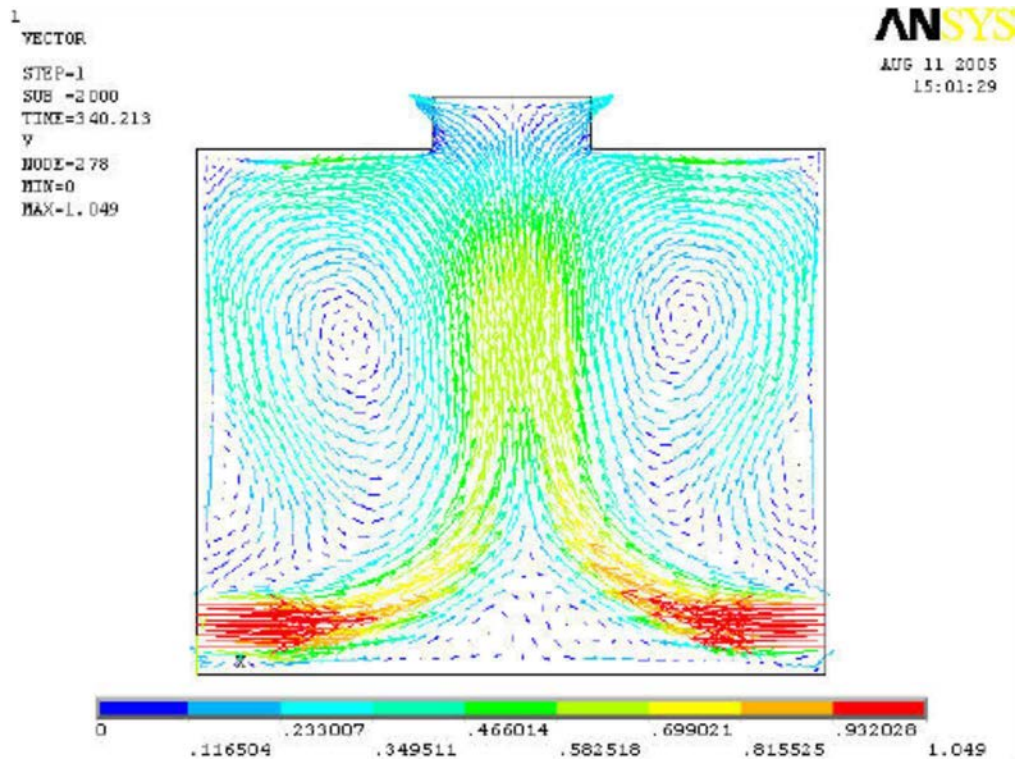
Caracteriza-se por ser uma área mais arejada quando comparada à produção. Atualmente possui uma carga térmica reduzida devido ao baixo número de equipamentos elétricos e poucas barreiras para entrada de ar proveniente da ventilação natural. Foram identificados os seguintes problemas:

- 1 – Posicionamento incorreto dos dutos de insuflamento;
- 2 – Regiões de estagnação;
- 3 – Ventilação natural ineficaz.

Para auxiliar o presente estudo na avaliação e entendimento do problema proposto, simulações aproximadas e simplificadas (2D) do problema através do uso de um software comercial CFD – *Computational Fluid Dynamics*, permitiu averiguar os resultados e confrontar com a hipóteses admitidas através do estudo da literatura. Baseado no estudo de Mazon (2005) pôde-se compreender os efeitos e comportamento de uma corrente de ar insuflada em um recinto variando-se parâmetros como: posicionamento da entrada de ar, tamanho do galpão, velocidade de admissão e gradiente de temperaturas. Vale lembrar que todas estas análises foram feitas de forma simplificada, não considerando os efeitos de geração de calor, fluxo de pessoas e maquinário.

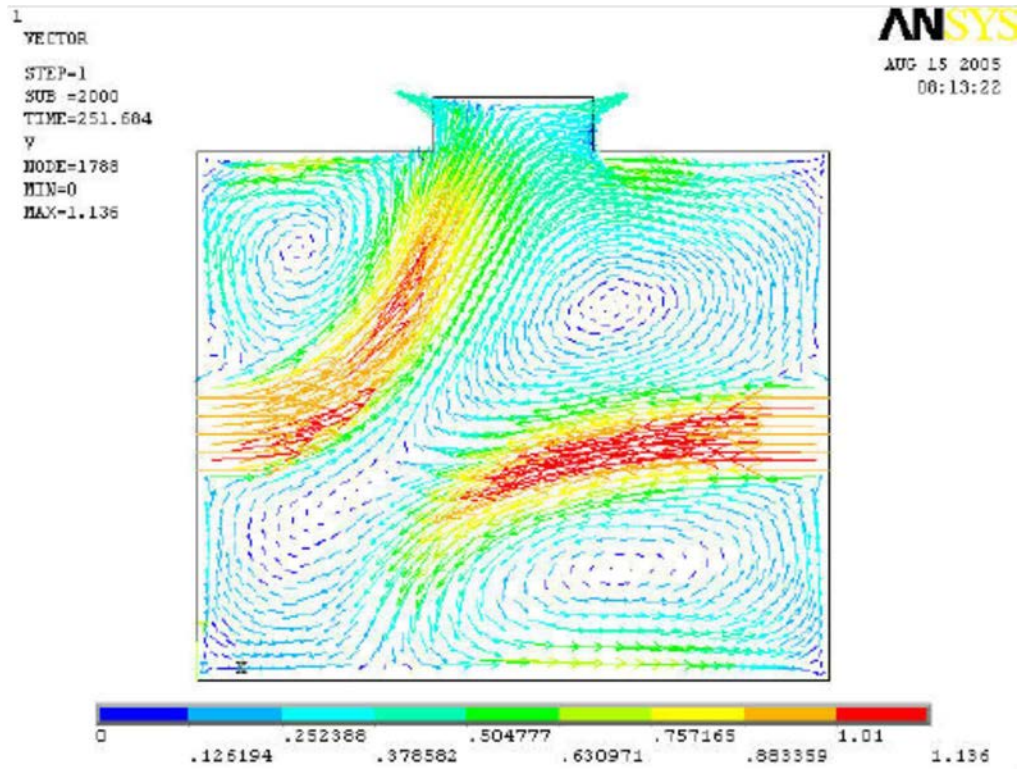
No estudo de caso apresentado, conforme mencionado anteriormente, fica caracterizado o posicionamento dos *blowers* de insuflamento de ar a uma altura elevada em relação ao piso. O estudo de Mazon (2005) demonstra como o posicionamento da admissão de ar influi a circulação do recinto. De início, a autora define seus parâmetros de análise para a simulação tomando como base um galpão retangular com 12 metros de largura e pé-direito de 8 metros, submetidos a uma velocidade de admissão de 1 m/s e diferença de temperatura de 8°C. Em um primeiro caso, a simulação acontece com os insufladores posicionados à altura do piso considerando-se duas entradas de ar e uma saída através do lanternim. As linhas de corrente são observadas na Figura 21. No segundo caso, considera-se a admissão posicionada na edificação a uma altura mediana, tendo o resultado apresentado na Figura 22.

Figura 21 – Admissão de ar à altura do piso (Estudo CFD)



Fonte: MAZON (2005)

Figura 22 – Admissão do ar à altura média (Estudo CFD)



Fonte: MAZON (2005)

Em relação ao posicionamento dos sopradores conclui-se que para uma altura mediana, como ocorre atualmente no estudo de caso, o efeito chaminé fica prejudicado. Observa-se que uma das correntes (lado direito) favorece a recirculação do ar ao nível do piso criando, portanto, uma zona de curto-circuito que tende a se aquecer devido ao contato com a carga térmica gerada não havendo posterior subida do ar em direção ao lanternim, gerando desconforto térmico aos frequentadores da área. Outro fato importante diz respeito à simetria apresentada quando as entradas se localizam ao nível do piso, diferentemente de quando se posicionam a uma altura mediana, permitindo realizar uma analogia de base empírica em relação ao caso em análise.

4.5 PROPOSTAS DE MELHORIA

Identificado os problemas e consideradas as devidas hipóteses, propuseram-se as seguintes possíveis soluções:

- 1 – Adição de um melhor sistema de ventiladores e distribuição dos dutos;
- 2 – Projeto de melhorias modificando atual layout dos dutos existentes;
- 3 – Adição de climatizadores evaporativos;
- 4 – Climatização do ambiente – ar condicionado;
- 5 – Adição de exaustores eólicos;
- 6 – Medidas paliativas.

Como parte do projeto de melhorias da ventilação, levando-se em conta fatores como investimento, melhor aproveitamento do sistema atual e baixo consumo energético, optou-se pela adoção das seguintes modificações:

- Produção
 - 1- Modificação do layout dos dutos, de forma que se utilizasse melhor o lanternim, ‘varrendo-se’ toda a área ao seu encontro;
 - 2- Adição de climatizadores evaporativos aspersores, visando um resfriamento localizado nos setores mais frequentados pelos colaboradores;

- 3- Adição de exaustores eólicos na laje técnica, buscando eliminar a carga térmica gerada pelos condensadores de ar condicionado;
- 4- Projeção dos insufladores ao nível do piso.

- Montagem

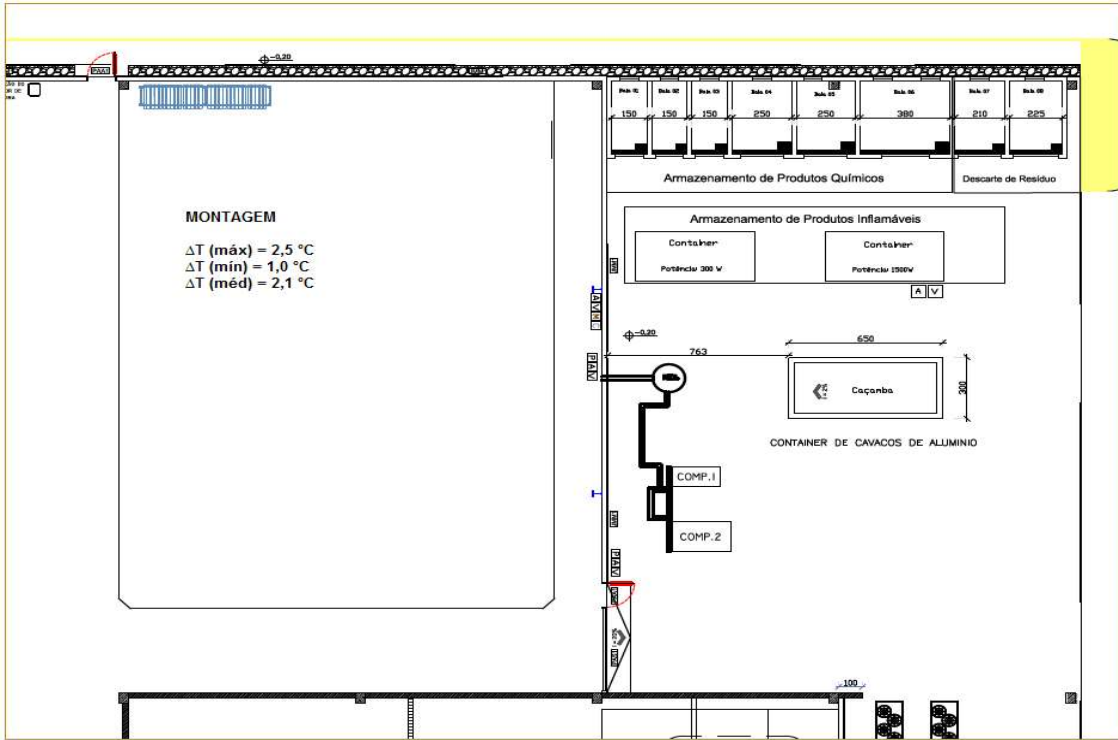
- 1- Modificação do layout dos dutos;
- 2- Adição de climatizadores evaporativos aspersores;
- 3- Projeção dos insufladores ao nível do piso.

4.6 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

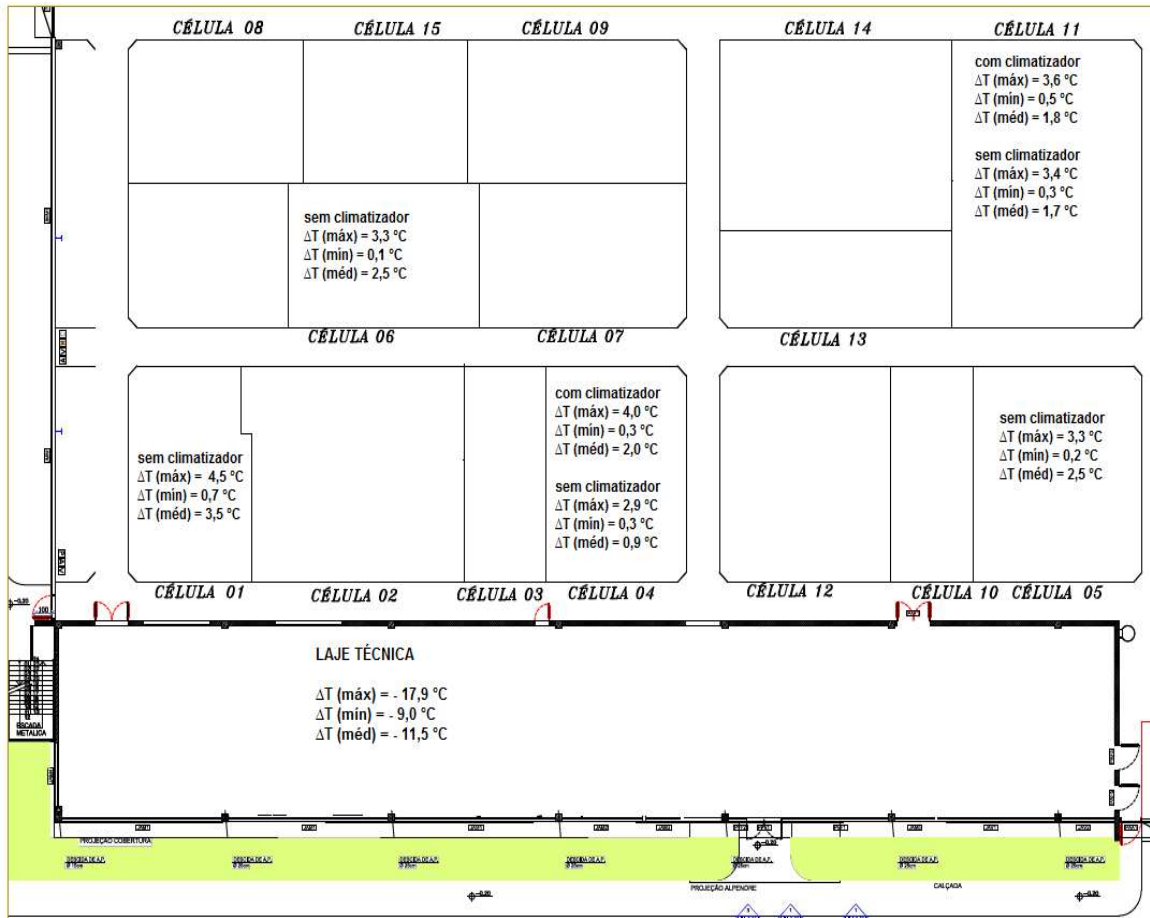
Realizadas as modificações propostas nas áreas produtivas e laje técnica, procedeu-se uma série de medições internas e externas utilizando-se termômetros de globo durante diversos dias para, em seguida, resumi-las na forma de mapas de calor. Os mapas indicam o diferencial entre a temperatura interna e externa para os diferentes pontos analisados da planta industrial. Desta forma, pode-se comparar os diferenciais medidos antes e após as modificações de forma a avaliar o efeito das mesmas. Espera-se nas áreas produtivas (usinagem e montagem) uma temperatura interna menor que a externa, logo, quanto maior for este diferencial, melhor a eficácia das modificações no sentido de extrair a carga térmica através da mais efetiva movimentação de ar. Observou-se ainda, que pela manhã, em alguns horários a área apresentava temperatura interna maior que a externa, porém tais pontos foram desconsiderados no mapa de calor. Para a laje de utilidades, a temperatura interna é maior que a externa, devido principalmente à alta carga térmica gerada pelos condensadores de ar condicionado, portanto, espera-se que ao contrário das áreas produtivas o diferencial de temperatura seja reduzido aproximando a temperatura interna (maior) da externa (menor). Neste caso, devido à inversão dos fatores o diferencial será indicado pelo sinal de menos (-), sem significado físico. Em suma:

Áreas produtivas: $\Delta T = T_{\text{externo}} - T_{\text{interno}} \quad T_{\text{externo}} > T_{\text{interno}}$

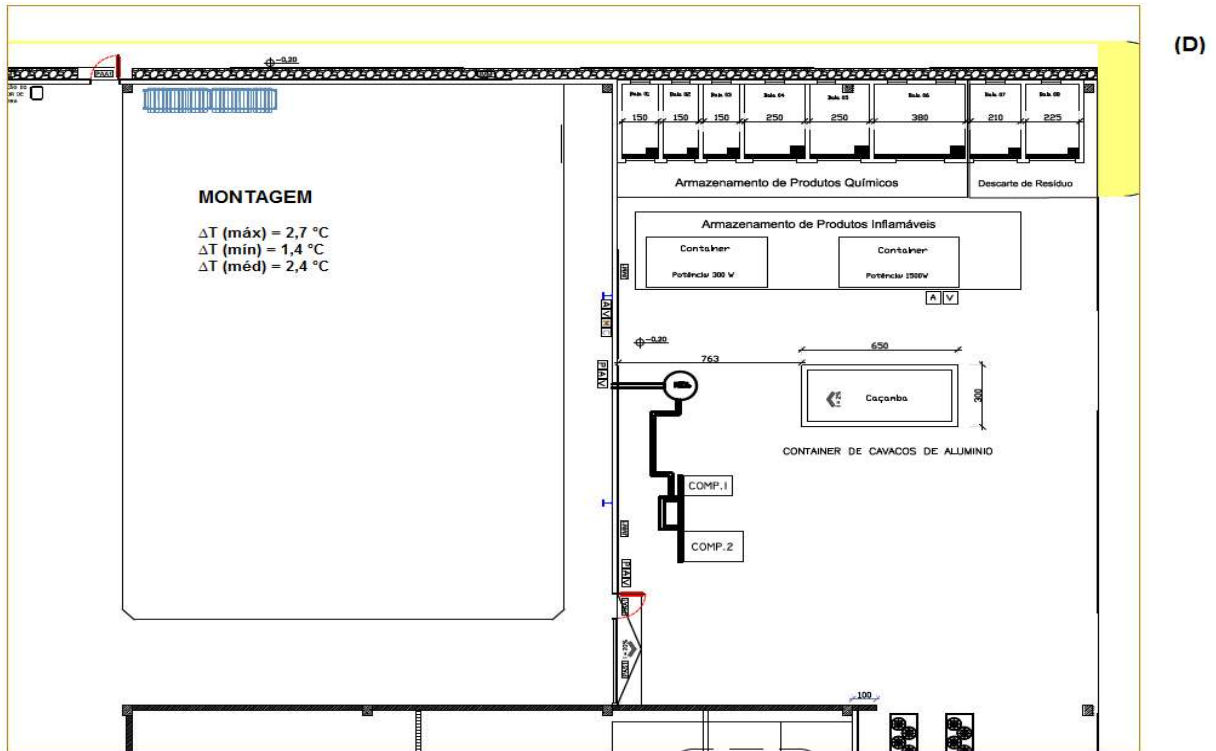
Logo: quanto maior ΔT » melhor



(B)



(C)



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 23 o aumento do diferencial das áreas produtivas (usinagem e montagem) e o aumento em módulo do diferencial da laje após a execução do projeto. Os valores medidos nas diferentes áreas permitem comprovar, portanto, a melhor movimentação de ar no galpão, potencializada pelo melhor uso do sistema de insuflamento em relação à configuração inicial quanto da intenção de se remover a carga térmica gerada pelas diversas fontes. Observa-se ainda, que o uso dos climatizadores evaporativos forneceu um aumento neste diferencial, embora de forma pequena e localizada como visto na célula 4, sendo sua eficácia muito limitada à distância da área a ser atendida e o ponto instalado, como se observa na célula 11, onde houve pouco efeito.

Por outro lado, embora tenha oferecido uma melhor movimentação de ar, os dutos de insuflamento destinados a atender a área de usinagem fornecem ar a uma temperatura elevada, muitas vezes acima da temperatura externa medida à sombra. Neste caso, em dias mais quentes, a elevada temperatura do ar na captação associada a sua movimentação sobre os colaboradores causa desconforto. Em comparação à área de montagem, observou-se um diferencial de aproximadamente 4 a 6°C no ar fornecido (medido na saída dos *dampers*), devido ao fato da unidade de ar se localizar a sombra e numa posição menos elevada em

relação à outra. Além disso, o dimensionamento atual dos ventiladores não atende os requisitos mínimos para todos os sopradores em relação ao fornecimento de ar (vazão). Desta forma, principalmente na montagem, onde se admite ar a uma temperatura mais baixa, a vazão não é suficiente para cobrir toda a área, com os sopradores mais distantes do ponto de admissão se encontrando praticamente inoperantes.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos diversos exemplos fornecidos neste texto pode-se observar quão atual e importante é o tema abordado neste trabalho, não apenas por visar o aumento da satisfação e produtividade de um indivíduo através do conforto térmico fornecido por uma das numerosas tecnologias, mas também por permitir a identificação de ferramentas para auxiliar na redução da necessidade de energia imposta pelo setor de climatização e refrigeração de ambientes. Embora a utilização da ventilação forçada e sistemas de ar-condicionado sejam atualmente os mais utilizados, constata-se através dos exemplos fornecidos, a real possibilidade da substituição destes aparelhos por alternativas menos convencionais, porém, mais econômicas. Como citado no texto, por exemplo, as cidades australianas apresentam altas temperaturas durante boa parte do ano, e o sistema de climatização adiabática se mostrou passível de ser utilizado com sucesso em substituição ao ar-condicionado.

Para possíveis pesquisas na área teórica, sugere-se:

- Aprofundamento na revisão sobre tecnologias alternativas, sendo cada tópico desta seção passível de um trabalho específico ou artigo, em especial sobre arquitetura sustentável;
- Revisar outras tecnologias de baixo consumo de energia como, por exemplo: climatização geotérmica, armazenamento de energia térmica subterrânea e outras características arquitetônicas que forneçam conforto térmico;
- Revisar e aprofundar as tecnologias neste trabalho descritas exemplificando-as através de casos de estudo.

Em relação ao estudo de caso, após a execução dos serviços, observou-se através de medições que as modificações propostas foram eficazes na laje técnica e em menor grau nas áreas produtivas. Na área de usinagem, embora a modificação dos dutos tenha conferido melhor movimentação de ar em relação à configuração anterior promovendo um abaixamento do diferencial, a alta temperatura de insuflamento sobre os trabalhadores causa certo nível de desconforto, potencializado quanto maior for a temperatura externa, de forma que em dias de muito calor, os mesmos preferiram ter o sistema desligado evitando a passagem do ar aquecido por eles. Conforme afirmado anteriormente, as altas temperaturas de insuflamento na área de usinagem geram desconforto, assim, principalmente no verão é provável que as temperaturas máximas e mínimas apresentem índices que superem o máximo do que permite a norma NR-

15 através do índice IBUTG, principalmente na área de usinagem. Na montagem, embora tenha ocorrido uma melhora, a mesma se limita devido ao baixo volume de ar insuflado pela unidade da área.

Sugere-se, portanto, para futuros trabalhos:

- Priorizar a instalação de um sistema de resfriamento de ar nos dutos de insuflamento da área de usinagem de forma a atingir uma temperatura de conforto nos meses quentes, utilizando o já existente sistema de serpentinas;
- Modificar o ponto de captação da unidade de ar que atende a usinagem;
- Adequar as grelhas de insuflamento de forma que a vazão seja maior na primeira linha de sopradores;
- Redimensionar os ventiladores para adequar a vazão necessária, principalmente na área de montagem mecânica. As normas recomendam que a velocidade de saída do ar deva ser em torno de 2-3 m/s.
- Simular o galpão utilizando algum software CFD, considerando as cargas térmicas geradas e temperaturas de admissão das correntes de ar.

REFERÊNCIAS

- AFLAKI, A. et al. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 101, p. 153–162, 2015.
- AL-ALILI, A.; HWANG, Y.; RADERMACHER, R. Review of solar thermal air conditioning technologies. **International Journal of Refrigeration**, v. 39, p. 4–22, 2014.
- ALLOCCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 8, p. 785–795, 2003.
- ALLOUHI, A. et al. Economic and environmental assessment of solar air-conditioning systems in Morocco. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, n. 0, p. 770–781, 2015.
- AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH) - COMMITTEE OF INDUSTRIAL VENTILATION. **Industrial Ventilation: a manual of recommended practice**. 19. ed. Lasing, Michigan, 1986.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **STANDARD 55: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, Eua, 2004.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. Tradução da sétima edição americana.
- BREESCH, H.; BOSSAER, A.; JANSSENS, A. Passive cooling in a low-energy office building. **Solar Energy**, v. 79, n. 6, p. 682–696, 2005.
- CHAN, H.-Y.; RIFFAT, S. B.; ZHU, J. Review of passive solar heating and cooling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 781–789, 2010.
- DE BOECK, L. et al. Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 960–975, 2015.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. State Energy Data Report: 3–7 Tables. In: EIA Energy Conference 2012, 2012, Washington. **Anais...** Washington, U.S. Department Of Energy, 2012. 456 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15251**: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Bruxelles, 2007.

EVOLA, G.; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 491–501, 2006.

GHIAUS, C. et al. Urban environment influence on natural ventilation potential. **Building and Environment**, v. 41, n. 4, p. 395–406, 2006.

GUGULOTHU, R. et al. A Review on Solar Powered Air Conditioning System. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 11, p. 361–367, 2015.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, F. An investigation into thermal comfort in office workers. **Journal of Institution of Heating and Ventilation Engineer**, v.38, p.181-189. 1970.

INTERNAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook. In: Release of Oil Market Report 2012, 2012, Paris **Anais...** Paris, IEA, 2012. 273 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Genebra, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15392**: Sustainability in Building Construction-General Principles. Genebra, 2008.

JU, C.; NING, Y.; PAN, W. A review of interdependence of sustainable building. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 56, p. 120–127, 2016.

KUBOTA, T.; AHMAD, S. Wind Environment Evaluation of Neighborhood Areas in Major Towns of Malaysia. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 5, n. 1, p. 199–206, 2006.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A. European smart cities: The role of zero energy buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 15, p. 86–95, 2015.

LIMA, J. F. **Arquitetura**: Uma experiencia na área de saúde. Nacional: Romano Guerra, 2012. 336 p.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002. 403 p.

MANZANO-AGUGLIARO, F. et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736–755, 2015.

MAZON, A. A. O. **Ventilação natural em galpões utilizando lanternins**. 2005. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MESQUITA, Armando Luiz de Souza; GUIMARAES, Fernando de Araújo; NEFUSSI, Nelson. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 442 p.

MILLER, R.; MILLER, M. R. **Refrigeração e ar condicionado**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 524 p.

RIVERA, J.-M. et al. Isolation of Legionella species/serogroups from water cooling systems compared with potable water systems in Spanish healthcare facilities. **The Journal of hospital infection**, v. 67, n. 4, p. 360–6, 2007.

RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178–205, 2015.

SANTAMOURIS, M. et al. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. **Solar Energy**, v. 55, n. 2, p. 111–124, 1995.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das habitações**. Maceió: Edufal, 1999. 170 p.

UNEP. Sustainable building and construction: facts and figures. In: United Nations Environment Assembly 2012, 2012, Kenya. **Anais...** Kenya, United Nations Environment Programme, 2012. 145 p.

WIKIPEDIA. **Evaporative cooler**. Disponível em:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporative_cooler#Physical_principles>. Acesso em: 10 dez. 2015

YU, Y. et al. Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney. **Applied Energy**, v. 114, p. 209–217, 2014.