

DN VENTILAÇÃO – ABRAVA – ARTIGO :

RESFRIAMENTO ADIABÁTICO – 100% VENTILAÇÃO !

“RESFRIAMENTO EVAPORATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO E SAÚDE OCUPACIONAL”

Por: Fábio Dugaich – Engenheiro Mecânico – FEI – Sócio Diretor da V-RAC Engenharia Térmica.

Breve histórico sobre o tema

Frequentemente somos chamados a atender demandas para regularização da condição de conforto térmico em ambientes industriais, de manufatura e de produção, processos estes que inexoravelmente devem iniciar com um Projeto específico de Engenharia Térmica, para ajuste e correção das condições térmicas de conforto destes ambientes.

Muitos destes chamados são, para adequar as acomodações industriais às exigências Legais, ou em eminente intercurso de reclamações trabalhista já em andamento.

Na grande maioria dos casos os colaboradores de produção e chão de fábrica são frequentemente expostos a elevadas temperaturas de bulbo seco (TBS), por longos períodos onde a temperatura interna do ambiente de fábrica já alcança faixas de (**+37 °C à +43 °C**), ambiente este onde os funcionários trabalham por longos períodos de tempo, nos dias mais quentes do ano, por vários anos seguidos, como se pode observar na (**figura-1**), conforme registro obtido em medição de temperatura e umidade local (**TBS = +38 °C / UR = 29,7%**)

Com relação às condições de umidade do ar destes ambientes de trabalho, também pudemos registrar faixas de umidade relativa variando entre (**UR% = 25 % ~ 33 %**) por grandes extensões de tempo ao longo da jornada diária de trabalho, sendo esta umidade classificada como muito abaixo do parâmetro recomendado pelas normas vigentes.



Figura - 1 Temperatura 38 °C e Umidade relativa 29,7% medidas em Ambientes Industriais de Produção e Manufatura.

Análise do ambiente industrial e corporativo

O ambientes em questão como se observa na (**figura-1**), mantem elevados níveis de temperatura por não possuírem qualquer tipo proteção, barreira ou contramedida para evitar a admissão da carga térmica proveniente das imediações e em especial da carga térmica de “Radiação Solar”.

Outros fatores agravantes se somam à livre admissão da carga térmica de radiação nestes ambientes, devem-se às condições construtivas que favorecem potencialmente a penetração de calor no ambiente, na totalidade das vezes ainda encontramos materiais construtivos com propriedades físicas favoráveis à transmissão de calor, sendo o efeito da radiação combinada nestes casos, a maior responsável pela carga térmica admitida no ambiente industrial.

Nesta fase os colaboradores destas organizações já estão invariavelmente expostos à carga térmica provenientes da Radiação solar nos ambientes que se somam às cargas próprias inerentes às fontes internas geradoras de calor como equipamentos e máquinas com alta liberação de calor, contribuindo para elevação severa das cargas térmicas.

A quantificação das cargas radiantes podem ser deduzidas por meio da equação de STEFAN BOLTZMANN, como se segue :

$$Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_e^4 - T_i^4)$$

Q	⇒ Fluxo de Calor de Radiação	[W/m ²] ; [kcal/h] ; [Btu/h] ; etc...
ϵ	⇒ Fator de Emissividade de Superfície	[adm]
σ	⇒ Coeficiente de Stefan Boltzmann	W/(m ² .K ⁴) ; kcal/(m ² .h.K ⁴) ; Btu/(ft ² .h.R ⁴) ; etc...
S	⇒ Superfície de Emissora de Calor	[m ²] ; [ft ²]
T	⇒ Temperatura Absoluta	[K] ; [R]

Figura – II Equação de Stefan Boltzmann – para quantificação da Carga de Radiação.

Quando projetamos a resultante destas cargas unitárias de radiação, incidentes nas coberturas destas edificações industriais, atingem-se facilmente os valores representados a seguir na (figura-III) :

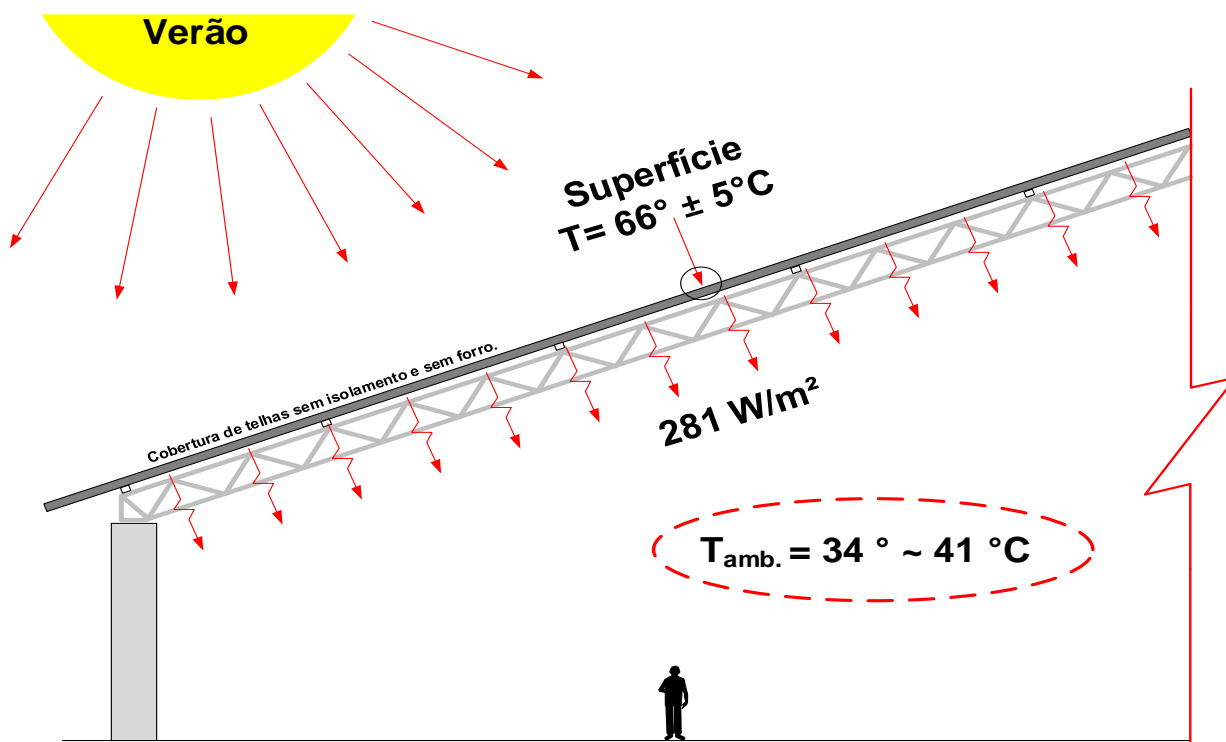


Figura – III Fluxograma esquemático da carga de radiação recebida por edificações Industriais.

Na (**figura-III**), podemos observar cargas térmicas unitárias que podem atingir faixas de transferência de calor entre **200 e 320 W/m²**, elevando substancialmente as temperaturas internas que historicamente se situam em faixas entre **+31 °C à +44 °C** , com níveis de umidade relativa do ar variando entre (**20% e 40%**), valores totalmente desaconselhados para conforto térmico e ainda menos para a saúde ocupacional do trabalhador com tipos de atividade física moderada ou severa.

Análise das condições térmicas e o amparo legal.

Os impositivos da Legislação Brasileira e das Normas Regulamentadoras em específico da Norma Regulamentadora **NR-15 (Portaria TEM 1297 de 13 de Agosto de 2014)** o empregador obriga-se ao enquadramento Normativo, em função da parametrização estabelecida em norma, definido jornadas de trabalho aceitáveis e amparadas sob aspecto legal, (**figura - IV**).

A NR-15 prevê paradas calculadas para cada hora de jornada de serviço ativo, que deverá ser interrompido para pausas de descanso estabelecidas, cujo tempo de parada vai aumentando em função da elevação da temperatura interna, estabelecendo os tempos máximos de trabalho permitidos nos locais de trabalho industrial, a que está o colaborador da empresa sob influência de temperaturas nas faixas entre **+25 °C à +32,2 °C** , como se vê abaixo.

Limites de Tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente com períodos de descanso no próprio local de prestação de serviço.

1. Em função do índice obtido, o regime de trabalho intermitente será definido no Quadro N.º 1.

QUADRO N.º 1

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

Figura – IV Tabela classificatória para jornadas de trabalho em ambientes, extraída da NR-15.

Medições e registros obtidos em campo

Abaixo como indicado na (**figura – V**), observamos a leitura medida em termômetro infravermelho, confirmando valores de temperatura de superfície interna das telhas de coberturas em ambientes Industriais, com registros de temperatura superiores a **61 °C** atingidas facilmente em alguns meses do ano, momento em que podemos quantificar o potencial de aumento da carga de calor a que são expostos os colaboradores e os ambientes de produção destas empresas.



Figura – V Medição de temperatura de superfície interna das telas “fibrocimento” com termômetro infravermelho.

Em nossas visitas técnicas ao longo destes anos pudemos registrar historicamente que a grande maioria das superfícies internas das edificações industriais são cobertas unicamente por telhas sem anteparos, e, na maioria das vezes encontramos as telhas metálicas e também em fibrocimento, são na maior parte das vezes a única forma de anteparo contra a fonte externa (Radiação Solar) e as demais cargas de transmissão que permeiam calor com muita facilidade para o ambiente interno.

Desta forma, tanto os colaboradores como os processos produtivos recebem elevados fluxos de calor, (*figura-III*), que ultrapassam os limites normativos estabelecidos para saúde ocupacional, e em alguns locais atingem níveis muito acima dos limites toleráveis, fora de enquadramento legal, tornando o local de trabalho insalubre resultando na perda de produtividade e elevação do turnover.

Registramos aqui um exemplo real que conduziremos por todo o conteúdo desta matéria, fazendo referência à Cidade de São Paulo, no mês de janeiro de 2021, obtidos os dados oficiais publicados pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, registradas no mirante de São Paulo disponibilizadas publicamente em registros horários.

Os valores diários que utilizamos foram formados pela média de (8) oito medições diárias separadas das **10:00 às 17:00** período de maior incidência de calor do dia, dez às dezessete horas, perfazendo uma coleta de três parâmetros **TBS / TBU / UR%** por 31 dias, perfazendo valores médios extraídos de 744 dados térmicos, para apresentação do exemplo, e cuja a tabela de médias é ilustrada abaixo de forma clara :

Os dados coletados no banco de dados do INMET , (*figura-V*) nos permite constatar as propriedades locais do “ar externo”, nos registros de temperatura e umidade obtidos há uma pressão atmosférica de **92,5 kPa** e altitude de **760 metros** (SP) :

- ⇒ Temperatura Seca do ar TBS = 25,9 °C
- ⇒ Temperatura Úmida do ar TBU = 20,1 °C
- ⇒ Umidade Relativa do Ar UR% = 59,8 %
- ⇒ Umidade Absoluta do Ar w = 13,8 g/m³_{as}
- ⇒ Entalpia do Ar h = 61,2 kJ/kg_{as}
- ⇒ Volume específico do Ar v_E = 0,949 m³/kg_{as}
- ⇒ Ponto de Orvalho do ar T_{PO} = 17,4 °C

OBS: os dados foram coletados atendendo as instruções técnicas contidas na NBR ABNT 16.401

01 À 31 DE JANEIRO DE 2021 - TEMPERATURAS E UMIDADE RELATIVA - MÉDIA HORÁRIA				
PERÍODO DE (8) HORAS - (10:00 ~ 17:00)			FONTE : INMET	
LOCAL MIRANTE DE SÃO PAULO - INFORMAÇÃO PÚBLICA				
PERÍODO	TBS - MÉDIO	TBU - MÉDIO	UR% - MÉDIO	Td
1 ~ 31	25,9 °C	20,1 °C	59,9%	21,3 °C
Amostra formada a partir de (744 dados) climáticos oficiais INMET		RENDIMENTO EVAPORATIVO DA INSTALAÇÃO ↓		
		$\eta \Rightarrow$		80%

Figura – VI – Medidas de temperatura e umidade externas, na cidade de São Paulo, registradas no verão – INMET.

Onde :

η = rendimento evaporativo do (RE) Resfriador Adiabático - [%];

TBS = temperatura externa de bulbo seco [°C];

TBU = temperatura externa de bulbo úmido [°C];

Td = temperatura resultante de descarga do ar resfriado adiabaticamente [°C];

Análise das dimensões envolvidas

Os galpões Industriais no Brasil, tem dimensões bastante consideráveis, e por suas características construtivas focadas nas reduções de custos, demonstram um cenário real que permanece inalterado por muitos anos, mesmo com as exigências legais e Normativas, na maioria das vezes negligenciada.

O investimento em conforto térmico industrial para fins de saúde ocupacional para a grande maioria dos administradores e empreendedores no Brasil é tido como impraticável.

O conselho de acionistas com raras exceções se determina a investir em instalações de conforto térmico ocupacional para seus colaboradores, o que vem sendo confirmado historicamente através dos anos, por inúmeras visitas técnicas realizadas para elaboração de projeto de implantação de sistema de conforto térmico, cujos investimentos na maioria esmagadora das vezes no Brasil com raríssimas exceções não se efetivam pela falsa percepção de que não trazem retorno financeiro “tangível”.

Em nossos registros históricos, somente em 3% dos chamados, o empreendedor se decide a fazer uma implementação de sistema de combate às cargas de calor, com amparo técnico de um projeto executivo de engenharia, para dar cumprimento à Legislação, e estabelecer condição térmica correta do ambiente, para o bem estar de seus colaboradores e adequação térmica de seus setores produtivos.

Estudo de Aplicação x Escolha do sistema de conforto.

A aplicação de soluções de conforto em ambientes Industriais com a implementação de instalações de sistemas convencionais conhecidos como o **Ar Condicionado (AC)**, que em grande parte das vezes são impeditivas para o ambiente industrial, haja vista os fatores a seguir :

⇒ *Fábricas com grandes áreas e volumes internos de produção inviabilizam esta tecnologia ;*

⇒ *As pequenas vazões de ar inerentes às máquinas de (AC) Ar Condicionado **700 m³/h.TR** ⁽¹⁾;*

- ⇒ Alto consumo de energia elétrica requerido por este tipo de instalação **1,1 ~ 1,45 kW/TR** ⁽²⁾ ;
- ⇒ O alto valor de instalação e Start-Up, hoje praticados em torno de **3.500 à 6.900 R\$/TR** ⁽³⁾ ;
- ⇒ Exige ambientes fechados para correta operação, o não que ocorre no ambiente industrial ;
- ⇒ A renovação de ar de um sistema de (AC) é **10% ~ 16%** da vazão de ar total deste sistema ;
- ⇒ Requer mão de obra especializada, requer custos elevados de manutenção e serviços ;
- ⇒ Sistema de ar condicionado não é ecológico, utiliza fluidos halógenos ⁽⁴⁾ e óleos sintéticos;

OBS: os índices acima estão indexados à unidade térmica (TR) “Tonelada de Refrigeração” muito utilizada no segmento HVAC.

(1) - (m³/h.TR) Vazão de ar mínima necessária para que o equipamento transporte um (TR) Tonelada de Refrigeração ;

(2) - (kW/TR) Potência elétrica em kW absorvida pelo equipamento para gerar uma Tonelada de Refrigeração (TR) ;

(3) - (R\$/TR) Custo unitário médio atual para aquisição e montagem de cada TR de uma instalação ;

(4) - compostos químicos formados por elementos: flúor (F), bromo (Br) e cloro (Cl).

Nestes casos recorrentes o empregador se depara com um dilema, podendo ele, seguir com a condição pré-existente, ou seja, manter (Temperaturas elevadas) no seu ambiente de fabricação sem investimentos em instalações de conforto térmico, e, portanto, colocar-se à mercê da legislação que estabelece a redução obrigatória da jornada de tempo de trabalho com implementação sucessivas paradas obrigatórias para descanso dos seus colaboradores incorrendo em custo adicional para compensar e manter os níveis de produção com inevitável aumento da MDO.

Ou adotar uma implementação que forneça condições internas aceitáveis de temperatura para o enquadramento normativo e que seja viável economicamente, removendo a carga térmica dos ambientes, o que poderá ser obtido com sistemas mais acessíveis, mais econômicos, e principalmente implementando os sistemas que operem com baixas taxas de consumo de energia, possibilitando trabalho contínuo de seu efetivo, sem interrupções e pausas onerosas, e portanto, sem aumento de efetivo.

Este problema atinge diversas empresas estabelecidas no Brasil, já há bom tempo, que trabalham fora dos quesitos Normativos, e portanto desamparadas por legislação e sujeitas à multas e passivos trabalhistas.

Surge então para estes casos, a tecnologia do Resfriamento Evaporativo ou Resfriamento Adiabático já conhecida, mas que em nossa opinião ainda está em estado embrionário no Brasil.

Comparado ao sistema anterior (AC), o Sistema de **Resfriamento Evaporativo (RE)**, possui tecnologia característica cujas principais condições, parâmetros, e fatores intrínsecos são :

- ⇒ Sistema opera com elevadas vazões de ar o que possibilita a rápida remoção das cargas térmicas internas do ambiente promovidas pela rápida renovação do ar interior que se dá pelo grande fluxo de ar externo resfriado adiabaticamente ;
- ⇒ Sistema adequado para operar preferencialmente em edificações com grandes áreas, grandes volumes e com grandes alturas de pé direito ;
- ⇒ Consumo de energia do sistema (RE) respeitadas as devidas proporções e condições, apresenta consumos de energia, em média, de **8 à 11 vezes** “menores” que as instalações de (AC) ;

⇒ Valor implantação de uma instalação de Resfriamento Evaporativo (RE), é aproximadamente **60% à 70%** do valor de uma instalação de Ar Condicionado para o mesmo ambiente ;

⇒ O sistema de (RE) opera perfeitamente, e ainda melhor, em ambientes abertos com grandes extensões de área e grandes volumes internos, com aberturas laterais e na cobertura, com várias passagens, entradas e saídas para logística do processo o que é muito característico do ambiente industrial, conceito totalmente oposto ao conceito de funcionamento do sistema de (AC) ;

⇒ O Sistema Resfriamento Evaporativo (RE) opera com **100%** de renovação de ar, possibilitando a condição permanente de ar novo no ambiente climatizado, condição totalmente oposta ao sistema de (AC) já abordado. que tem limites máximos de **16%** de renovação ;

⇒ O sistema (RE) promove naturalmente diversos benefícios relacionados ao conforto térmico para ocupantes e para o ambiente climatizado, como a pré-filtragem do ar, remoção de sujidades, particulados e póis, que são extraídos do fluxo de ar resfriado, por meio da lavagem do ar, que é uma característica inerente ao sistema de (RE) e também a elevação da umidade do ar ;

⇒ Sistema de (RE) requer baixo custo de manutenção, pois além da limpeza da máquina e lavagem das células evaporativas, painel evaporativo de celulose necessita de pouca manutenção e ajustes nos componentes de transmissão mecânica (ventilação), e portanto dispensa a mão de obra especializada e cara ;

⇒ O projeto de resfriamento e conforto para o ambiente deverá garantir que o ar interno possa ser totalmente renovado, ou de forma natural por meio de aberturas, vãos, frestas e saídas de ar, e caso isso não seja possível, o ar interno deverá ser removido meio de exaustão mecânica ;



(figura - VII) Tipo de Edificação apropriada para instalações de resfriamento evaporativo – escolas do SESI – SP.

OBS : Solução típica para Projetos de Instalações de Resfriamento Evaporativo (RE) para obtenção de conforto térmico, aplicado à áreas abertas, grandes cargas de ocupação, corredores abertos, tijolos vazados, coberturas translúcidas para iluminação natural, áreas com grande incidência solar, grandes vãos abertos para renovação e troca de ar interno.

Requisitos para implantação do sistema de Resfriamento Evaporativo.

Quando Comparados, os dois sistemas (AC) e (RE), podemos observar diferenças substanciais, no que diz respeito às reduções de temperatura primária possíveis proporcionadas diferentemente pelos dois sistemas.

Sendo o diferencial de temperatura o principal responsável por viabilizar a redução de temperatura do ambiente climatizado, e, portanto, do êxito na obtenção da condição de conforto térmico necessária deste ambiente, comparamos os desempenhos :

O sistema de Ar Condicionado produz diferenciais de temperatura bastante substanciais, podendo alcançar facilmente diferenças de $\Delta T = 13 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$ de redução de temperatura (diferencial) entre a entrada e a saída de ar no equipamento, ou ainda, a redução de temperatura na descarga de ar do equipamento.

O Sistema Evaporativo ao contrário, está calcado em um fenômeno físico natural conhecido como a propriedade psicrométrica do ar, mais especificamente no nosso estudo, a capacidade de produzir o fenômeno de evaporação da água.

Assim a água posta em contrafluxo com grandes vazões de ar, se evapora quando absorve parcialmente energia deste mesmo ar.

O processo adiabático de evaporação de água por consequência reduz a temperatura do fluxo de ar que sai do equipamento (RE) e também aumenta a umidade absoluta deste mesmo ar, o que significa dizer que nenhuma energia, externa é adicionada ou removida do ciclo termodinâmico adiabático para produzir o resfriamento do ar, no interior do equipamento evaporativo, produzindo adiabaticamente o resfriamento desejado.

Neste caso o sistema faz uma permuta endógena de energia, ou ainda uma troca de calor interna entre os dois fluidos em contrafluxo, (Ar x Água), onde o equipamento tem como premissa promover a máxima potencialização deste efeito físico de evaporação natural da água por meio do contato forçado desta água com grandes fluxos de ar externo.

As altas taxas de vazão de ar intrínsecas dos equipamentos de (RE) resfriamento evaporativo, são quantitativamente de **3 a 7 vezes** “maiores” quando comparadas às vazões projetadas para o sistema de (AC) ar condicionado, para uma mesma instalação, guardadas as proporções e variações de caso a caso.

A maior e fundamental característica construtiva do (RE) é possuir uma grande área de contato físico entre os dois fluidos (Água x Ar), o que se propicia pelos painéis evaporativos, também conhecidos no mercado como (Colmeia).



Figura – VIII – Placa de material em papel de celulose especial tratado com resina – (Painel evaporativo ou Colmeia)

A forma construtiva dos resfriadores evaporativos como vimos estão providos de grandes superfícies (área) de contato físico entre os dois fluidos, e, nesta condição, velocidade do ar nos painéis evaporativos elevam o coeficiente de película do sistema, elevando ainda mais as taxas de troca de calor entre água e ar, e embora haja uma limitação psicrométrica para o máximo diferencial de temperatura do ar para as regiões onde estão sediadas as instalações, não haverá limites de projeto para as quantidades de ar, (vazões) a serem disponibilizadas por projeto aos diferentes tipos de instalações.

A velocidade de superfície eleva substancialmente o coeficiente de película entre os dois fluidos (ar e água) fazendo com que o processo de evaporação da água se eleve, porém a água necessita de energia para se evaporar, e retira esta energia do ar que submetido ao contrafluxo com a água nos painéis evaporativos perde (cede) energia para a água e sofre uma redução de sua temperatura que é o efeito desejado.

Desta forma o resfriador evaporativo utiliza vários fatores físicos e mecânicos que trabalham juntos para potencializar a evaporação da água, assim como seu sistema de ventilação é desenvolvido para grandes fluxos de ar, produzindo excelentes taxas de redução de temperatura do ar insuflado.

Desta forma o projetista mecânico de instalações de Resfriamento Evaporativo, poderá deferir com segurança a viabilidade técnica de aplicação desta tecnologia, a princípio, em regiões onde a condição climática possibilite à instalação, alcançar reduções médias de temperatura do ar na descarga do equipamento entre $\Delta T = 4 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$, que é a variação de temperatura (diferencial) medida entre a entrada e a saída de ar no equipamento, valores que se verificam na grande maioria dos projetos de implantação (RE) sendo este o efeito de redução de temperatura médio final destas instalações.

Analogicamente podemos equiparar as regiões com condições climáticas naturais tenham historicamente variações de umidade relativa do ar entre **30% ~ 70%**, ou seja, regiões em que os resfriadores evaporativos possam de fato produzir o efeito de resfriamento adiabático natural do ar, em níveis satisfatórios para neutralização da cargas térmicas da edificação.

Redução efetiva de temperatura de um sistema de Resfriamento Evaporativo.

Aqui exemplificamos matematicamente a viabilidade do sistema (RE) na condição apresentada na (**figura – V**), onde definido o diferencial possível de redução de temperatura, como média global da cidade de São Paulo e os seus consequentes resultados, obviamente (respeitadas as variações climáticas), os diferentes locais de instalação e os diferentes períodos das estações do ano, sendo estes fatores o objeto de máxima atenção do (projetista).

O diferencial acima porém não poderá ser definido por equivalência como ocorre em um projeto de um sistema de (AC) ar condicionado, que, uma vez conhecida a carga térmica define-se imediatamente a capacidade do equipamento.

No caso do sistema de (RE) Resfriamento Evaporativo isso não se verifica, pois a instalação adequada só poderá ser projetada por meio de rigoroso estudo de condição climática histórica da região de implantação, da qual deverão ser muito bem conhecidas as temperaturas máximas

históricas, as temperaturas médias anuais, as temperaturas históricas mensais de Bulbo Seco, Bulbo Úmido, Umidade relativas, altitude, densidades do ar, volumes específicos, umidades absolutas, as entalpias (energia por unidade de massa), cujos dados devem ser obtidos em seus valores históricos, normalmente encontrados em períodos horários, diários, mensais e anuais, cujos valores armazenados podem ser encontrados nos registros climatológicos de órgãos competentes, cujos valores devem ser processados por meio de cálculos simultâneos utilizando-se equações de transferência de calor e demais equações da psicrometria.

Como se observa, o sistema de resfriamento evaporativo por seu processo natural produz diferenciais de temperatura menores que o sistema de ar condicionado, e, portanto para compensar este déficit, o sistema (RE) se vale de taxas de vazões de ar substancialmente mais elevadas que o (AC) para promover a mesma neutralização das Cargas Térmicas e o equilíbrio térmico esperado na edificação.

No caso apresentado para exemplificação em que as temperaturas foram registradas na condição térmica de verão, a temperatura média de bulbo seco é **TBS=25,9 °C** e a temperatura média de bulbo úmido é de **TBU=20,1 °C**, o valor exato deste diferencial de temperatura entre os bulbos é de **5,8 °C**.

O que significa dizer que na condição perfeita, com **100%**, de rendimento de evaporação da água, uma instalação de resfriamento adiabático conseguiria teoricamente promover a regime permanente, as reduções de temperatura desta magnitude.

Porém, como qualquer outro sistema (máquina), a tecnologia do Resfriamento Evaporativo é um dispositivo mecânico e limitado, que se vale das leis físicas naturais, e também está sujeito à um desempenho, ou rendimento limite.

Todo equipamento de resfriamento evaporativo está limitado ao seu fator construtivo que se traduz no rendimento evaporativo do (conjunto mecânico), ou ainda, possui um rendimento menor que o ideal, advindo do fenômeno natural de evaporação atmosférica.

Os fabricantes de sistemas adiabáticos (RE) produzem equipamentos com um rendimento evaporativo (η), e os que apresentam melhor custo benefício são os equipamentos com rendimentos de **80%**.

Os resfriadores com rendimentos evaporativos inferiores à **80%** apesar de mais baratos, não produzem efeitos de redução de temperatura significativos, e em contrapartida, os equipamentos com rendimentos superiores à **90%** são volumosos e dispendiosos, elevam o tamanho das máquinas e seus custos, produzindo diferenciais de redução de temperatura ligeiramente maiores, que não compensam em relação ao custo e o tamanho final da máquina.

Assim o rendimento evaporativo (η) mais aplicado comercialmente é o de **80%**, desta forma o nosso exemplo, utilizando as equações térmicas de rendimento evaporativo será :

$$\eta = \frac{(TBS - Td)}{(TBS - TBU)}$$

Onde :

η = rendimento evaporativo do (RE) Equipamento - [%] ;

TBS = temperatura externa de bulbo seco [°C] ;

TBU = temperatura externa de bulbo úmido [°C] ;

Td = temperatura resultante de descarga do ar resfriado adiabaticamente [°C] ;

Utilizando nosso exemplo a temperatura externa $TBS = 25,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e a $TBU = 20,1 \text{ }^\circ\text{C}$ terão como resultante a temperatura de descarga de ar do resfriador evaporativo $Td = 21,3 \text{ }^\circ\text{C}$, ou ainda, o diferencial térmico será de $4,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Já para equipamentos com rendimento evaporativo de **90%** este diferencial térmico passa a $5,2 \text{ }^\circ\text{C}$, e a temperatura de descarga será $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para rendimentos evaporativos de **95%** este diferencial térmico alcançará $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$, com ganho de apenas $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ na redução final de temperatura, ganho este com pouco significado para o aumento de custo de fabricação deste equipamento.

Comparativo entre Capacidades e Vazões de ar.

Portanto, para um sistema de ar condicionado cuja carga térmica seja de **50 TR** serão necessárias vazões de ar na faixa de **35.000 m³/h** para transferência efetiva da carga térmica.

Com relação ao sistema de (RE) resfriamento evaporativo para a mesma carga térmica de **50 TR**, serão necessárias vazões de ar resfriado adiabaticamente na faixa de **136.260 kg/h**, ou ainda de **129.310 m³/h**.

Portanto, como abordado anteriormente, o sistema evaporativo neste caso e neste local requer vazão de ar **3,7** vezes maior que a do sistema de ar condicionado para neutralização da mesma carga térmica de **50 TR**, em média para uma edificação na cidade de São Paulo - SP.

Desta forma, considerado o rendimento evaporativo da instalação de **80%** o é insuflado para dentro da edificação a uma temperatura de **21,3 °C** o que significa dizer que quanto maior a vazão de ar fornecida pelo sistema de resfriamento adiabático mais próximo desta temperatura de insuflamento estará o estará a temperatura interna da edificação.

Apresentamos um CASE real onde foi removida uma instalação de (AC) Ar Condicionado existente, que deu lugar a uma instalação de (RE) Resfriamento Evaporativo, anexo apresentados em forma de tabela, na figura (**figura – XI**) este sistema de resfriamento evaporativo foi projetado e instalado na cidade de São Bernardo do Campo - SP :

CASE REAL – RESPOSTAS TÉRMICAS DE INSTALAÇÕES DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

GALPÃO INDUSTRIAL – LOCALIZAÇÃO ⇒ S. B. CAMPO – SP.

1-) A carga térmica do ambiente será reduzida por meio dos **Resfriadores Evaporativos**, que neutralizarão as cargas térmicas, reduzindo a temperatura interna do (Galpão Industrial) mesmo nos dias mais críticos, as temperaturas internas foram reduzidas de (**34 °C**) para (**26 °C**) o que se verifica mesmo durante as piores condições térmicas de verão.

2-) O projeto foi realizado para que ao final do processo a umidade relativa (**UR%**) resultante no ambiente **Galpão Industrial**, piores condições de verão, tivesse as seguintes condições, Umidade Interna inicial ⇒ (**UR% = 58% ~ 68%**) e umidade final (resultante) ⇒ (**UR% = 75% ~ 85%**).

3-) Redução Real de Consumo elétrico da Industria obtida com a implantação foi de (06) seis vezes, passando de (**10.403 kWh**) para (**1.693 kWh**) ;

4-) Condições térmicas finais, e o novo “Perfil Energético”, desta indústria após a migração do sistema existente de (AC) para o sistema de (RE), pode ser observado na tabulação abaixo:

BALANÇO ENERGÉTICO COMPARATIVO ENTRE AS DUAS INSTALAÇÕES :

⇒ ↓	EQUIPAMENTO	RESFRIADOR EVAPORATIVO (Sistema Novo)	CONDICIONADOR DE AR (Sistema Removido)
1	QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS	06 un	09 un
2	MODELO	PAINEL DE CELULOSE	COMPRESSÃO CICLO FRIO
3	CAPACIDADE UNITÁRIA	45.000 (m ³ /h)	58.000 (btu/h)
4	CAPACIDADE TOTAL	270.000 (m ³ /h)	522.000 (btu/h)
5	POTÊNCIA ELÉTRICA UNITÁRIA	1,47 kW	6,02 kW
6	POTÊNCIA ELÉTRICA TOTAL	8,82 kW	54,18 kW
7	USO DIÁRIO HORAS	8	8
8	DIAS UTILIZADOS NO MÊS	24	24
9	HORAS DE USO MENSAL	192 (h/mês)	192 (h/mês)
10	CONSUMO DE ENERGIA MENSAL	1.693,44 kWh	10.402,56 kWh
11	CUSTO DO kWh INDUSTRIAL – (NA ÉPOCA)	R\$ 0,61	R\$ 0,61
12	CUSTO DE ENERGIA MENSAL	R\$ 1.032,99	R\$ 6.345,56
13	ECONOMIA MENSAL – ENERGIA ELÉTRICA	8.709,12 kWh	
14	ECONOMIA MENSAL – VALOR (R\$)	R\$ 5.312,57	
15	SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO	Simplex lavagem	Equipe Especializada
16	MEIO REFRIGERANTE	Água	R-410A
17	PAY-BACK DA INSTALAÇÃO ⇒	17,6 Meses ⇒	1,4 ANO

Figura – IX – Tabulação comparativa entre os sistemas (RE) e o sistema (AC) e suas equivalências energéticas e térmicas.