

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO



CALDEIRAS

A

VAPOR

OPERAÇÃO



CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

I- INTRODUÇÃO

Caldeira é um equipamento projetado e estruturado para gerar vapor através da troca térmica entre a água e um combustível (sólido, líquido ou gasoso), elétrico ou não que através da combustão dele fornecerá energia térmica para a água, que elevará sua pressão e com isto dará início a formação do vapor.

Este vapor terá a sua característica definida conforme sua pressão de trabalho e a necessidade básica de cada indústria e processo.

De acordo com a NR 13 caldeira é definida como:

13.1.1. Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares, tachos com camisa de vapor, cozedores com camisa de vapor, autoclaves etc., utilizados em unidades de processo.

O vapor pode ser usado em diversas condições tais como:

Baixa pressão, alta pressão, saturado, superaquecido, etc.

Ele pode ser produzido também por diferentes tipos de equipamentos nos quais estão incluídas as caldeiras com diversas fontes de energia.

Para efeito da NR-13, serão considerados, como “caldeiras” todos os equipamentos que simultaneamente geram e acumulam vapor de água ou outro fluido.

1 – FÍSICA

1.1 - FORÇA

A força mais conhecida é o peso de um corpo. Este peso é medido em kgf ou kg.

Foi definido que o quilograma força corresponde ao peso padrão internacional de massa (chamado quilograma massa) onde a aceleração da gravidade tem um valor igual a $9,80667 \text{ m/s}^2$.

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

No Sistema Internacional (SI) foi adotado o Newton (N). Um quilograma força é equivalente a **9,81 Newtons = 9,81 N**

Poderemos definir o conceito de força como expressão matemática conforme a segunda lei de Newton que diz: a força que atua sobre um corpo é proporcional ao produto da massa pela aceleração na direção da força, ou seja:

$$F = m \times a = \text{kg} \times \text{m/s}^2 = \text{Newton (N)}$$

Abaixo algumas unidades de força:

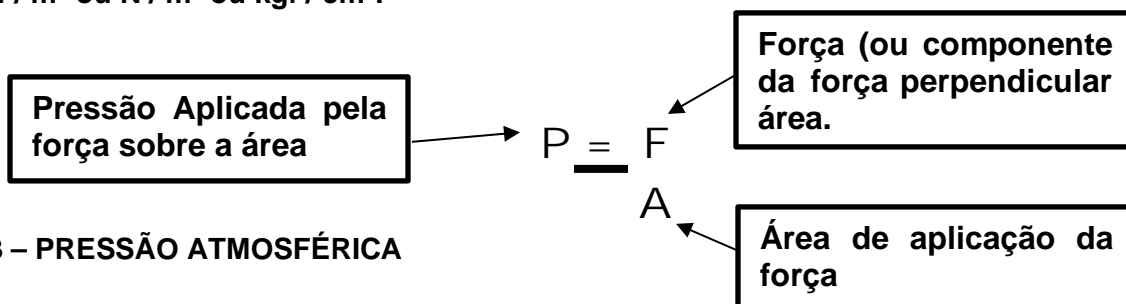
1 dina	$1 \text{ gm} \times \text{cm/s}^2$
1 N	$1 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$
1 kgf	$9,80667 \times \text{kg.m/s}^2 = 9,80667 \times \text{N}$
1 lbf	$32,174 \times \text{lbf.m.pé/s}^2$

1.2 – PRESSÃO

Definimos pressão como a força normal por unidade de área, ou seja, a força aplicada sobre uma determinada área ou superfície, como mostra a expressão matemática $P = F/A$

Em relação aos gases a pressão exercida é a mesma em todas as direções. Como já definimos força como unidade em kgf, N, e área em m^2 , cm^2 , logo teremos as unidades de pressão mais comumente usadas:

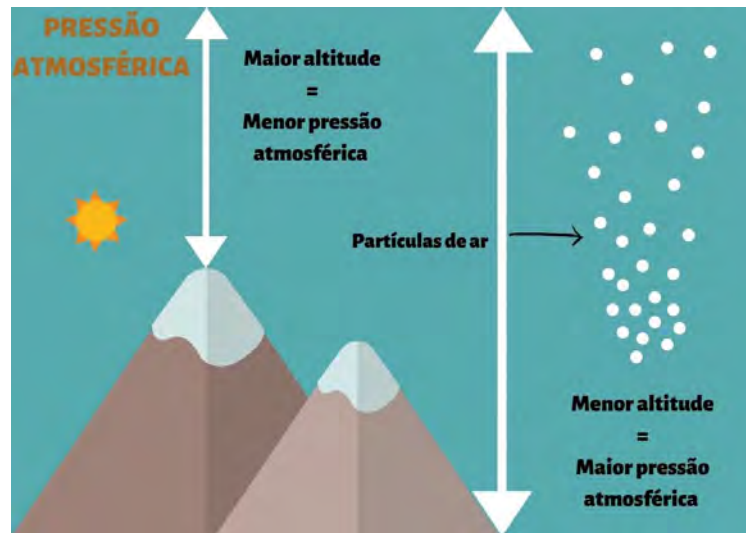
kgf / m^2 ou N / m^2 ou kgf / cm^2 .



1.3 – PRESSÃO ATMOSFÉRICA

É denominada de pressão atmosférica (1 atm) a nível do mar, a pressão de uma coluna de exatamente 76cm ou 760mm de mercúrio a 0°C , sob a aceleração da gravidade normal $g = 980,665 \text{ cm/s}^2$. A pressão atmosférica diminui com a altitude.

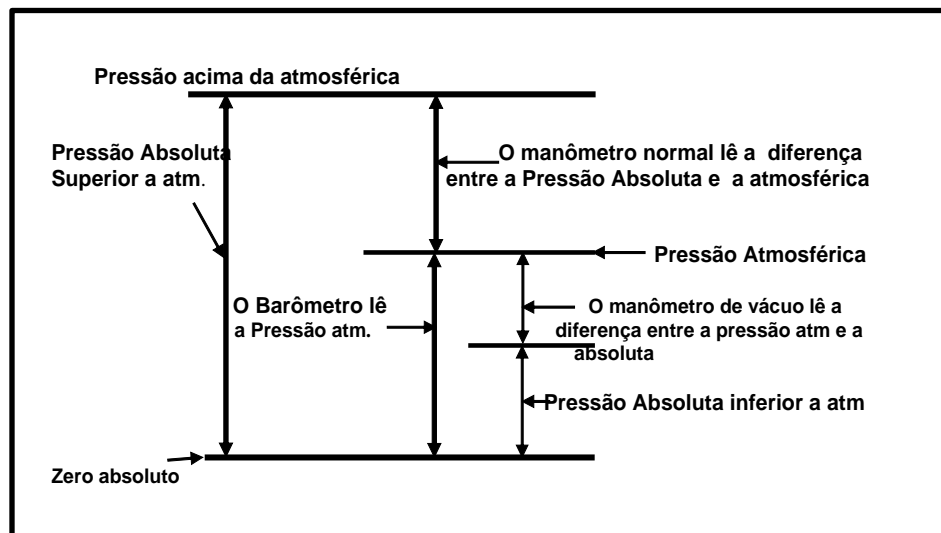
CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO



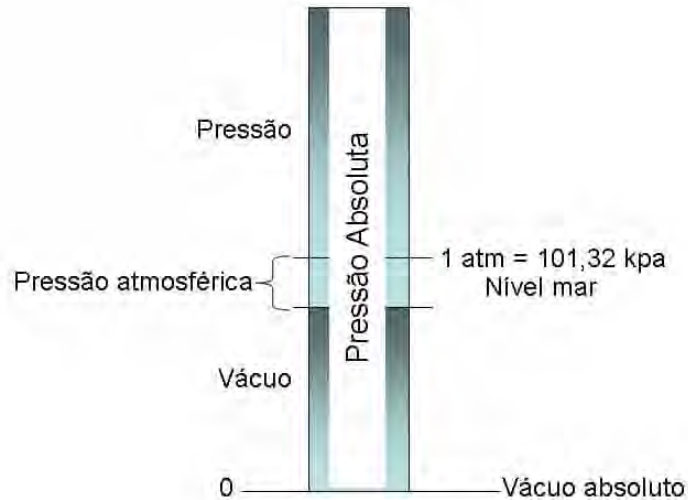
1.4 – PRESSÃO ABSOLUTA

Como falamos, a pressão interna de um vaso é medida por um manômetro e é lida como a pressão manométrica ou relativa, ou seja, a pressão absoluta é a Pressão Interna do Vaso + Pressão Atmosférica. A figura 2 abaixo ilustra melhor a diferença de pressões:

$$P_{abs} = P_{manométrica} + P_{atm.}$$



CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO



1.5- UNIDADES DE PRESSÃO

O sistema de unidades recomendado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é o Sistema Internacional (SI):

Pressão	bar	Pa (Pachoa l)	Kgf/cm ²	lbf/pol ² (psi)	m.c.a(H ₂ O)	atm	mm.Hg (Torr.)
bar	1,0	10 ⁵	1,019716	14,503	10,19716	0,9869	750,062
Pa	10 ⁻⁵	1,0	0,000010197	0,00014503	0,00010197	0,0000098	0,0075
Kgf/cm ²	0,98	98066,5	1,0	14,2233	10,0	0,967841	735,556
lbf/pol ² (psi)	0,0689	6894,8	0,0731	1,0	0,70307	0,068	51,71486
m.c.a (H ₂ O)	0,098	9803,11	0,10	1,42233	1,0	0,09678	73,5514
atm	1,0132	101325	1,03323	14,6959	10,33226	1,0	760
mm.Hg (Torr.)	0,0013	133,322	0,00135951	0,01933677	0,13360	0,0013157	1,0

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

1.6 - Manômetros

A pressão de um gás contido num recipiente fechado, mede-se com um manômetro, instrumento inventado em 1661 pelo físico e astrónomo holandês Christiaan Huygens (1629-

Modelos de manômetros:



1.7 O Volume

O volume é a medida do espaço ocupado pelo sistema. No caso dos gases, estes devem estar contidos num recipiente fechado. O espaço tridimensional existente no recipiente corresponde ao volume. O volume pode obter-se usando uma régua e efetuando os cálculos necessários. Em unidades do Sistema Internacional é expresso em metros cúbicos, m^3 . Vulgarmente, em química, é frequente usar-se o litro - L e o mililitro - ml.

2 – CALOR E TEMPERATURA

2.1 – CALOR

Calor é uma forma de energia produzida pelo movimento das moléculas ou dos átomos. É também conhecida como energia térmica.

O conceito de calor é utilizado pela população, em senso comum, de forma nem sempre muito científica, geralmente apegado à ideia do calórico. Assim, costuma-se ouvir casos como: "que calor", "que frio e outros. Assim, em pleno verão ou outono, as pessoas costumam reclamar da temperatura - "que calor insuportável!", "que frio!" Para ter conforto físico, vestem roupas leves quando a temperatura sobe, a fim de *diminuir o calor* e se agasalham quando a temperatura ambiente cai a fim de "conservarem o calor" de seus corpos de forma que o organismo não fique

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

exposto às alterações térmicas que prejudicariam sua estabilidade. Entretanto vemos que alguns acabam acertando: o ar refrigerado dá uma agradável sensação de bem-estar porque é controlado para manter o calor em nível agradável, sejam quais forem as alterações climáticas que possam ocorrer.

É correto afirmar que nossos corpos são sensíveis ao calor, e a sensação de quente e frio que temos fisicamente encontra-se associada ao calor e não à temperatura dos corpos ou ambiente em questão.

Quando há calor em demasia saindo dos nossos corpos, temos a sensação e reações orgânicas associadas ao "frio", e quando há pouco calor liberado pelo corpo ao ambiente, temos a sensação de "quente" (ou, de forma controversa, "de calor", em senso comum). Sendo sua mão sensível ao calor e não à temperatura, jamais a use como termômetro para inferir a temperatura de uma pessoa, portanto.

Além de ligar-se ao nosso bem-estar, o calor também é muito importante em nossa vida em diversos fenômenos que vão além da sensação que nos causa. Com o calor se cozinha os alimentos, se aquece a água, seca-se a roupa, etc. Na indústria, o calor é utilizado para levar os minérios dos metais ao ponto de fusão e na transformação destes em variados utensílios - de arados a armas de guerra - para preparar a cerâmica, para produzir papel, tecidos, vidro.

O calor produzido na queima de combustível em motores é a fonte primária de energia a ser utilizada para movimentar-se as máquinas térmicas, a saber automóveis, navios, aviões e foguetes. Nas usinas termoelétricas e nucleares, o calor aquece o fluido que faz girar as turbinas, que movimentam geradores, e produzem energia mecânica. O calor que o homem usa provém de diversas fontes. As principais são os produzidos a partir do Sol, de reações químicas e da energia nuclear.

Apesar de tão evidente, a natureza do calor só recentemente foi definida pela ciência. Até o final do século XVIII, os cientistas acreditavam que o calor era uma espécie de fluido imponderável (sem massa) e invisível que aquecia ou resfriava os corpos. Deram a essa substância o nome de *calórico*. O equilíbrio térmico era mantido quando os corpos ganhavam ou perdiam calóricos.

Em 1798, o físico Benjamim Thompson, conde Rumford, observou que o atrito aquecia os metais e depois o calor se conservava por algum tempo nas peças atritadas. Logo, o calor seria uma forma de energia obtida pelo trabalho mecânico. Já o químico inglês Juchg Heghref concluiu que essa teoria poderia ser demonstrada esfregando-se dois blocos de gelo que se derreteriam pelo atrito, sem possuir calóricos. Assim se produzia calor do nada.

Foi o físico alemão Hermann Von Helmholtz que, em 1847, estabeleceu a definição de calor como energia mecânica, afirmando que todas as formas de energia equivalem a calor. Isso foi provado logo depois por seu colega inglês James Prescott Joule. Construindo um aparelho simples, que

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

aproveitava o trabalho mecânico produzido pela queda de corpos, Joule mediu a quantidade de energia mecânica necessária para elevar por agitação a temperatura de uma certa quantidade de água. Estava demonstrada quantitativamente a equivalência mecânica do calor.

Concluimos que, assim como o movimento produz calor, o calor, por sua vez, produz movimento. Desse modo a antiga teoria dos calóricos se uniu com a nova noção de energia térmica, acabando suprimida no paradigma moderno de calor.

2.1.1 Tipos de calor

Calor sensível: provoca apenas a variação da temperatura do corpo. A quantidade de calor sensível (Q) que um corpo de massa m recebe é diretamente proporcional ao seu aumento de temperatura. Logo, é possível calcular a quantidade de calor sensível usando a seguinte fórmula:

$$Q = m.c.\Delta t$$

Calor latente: provoca algum tipo de alteração na estrutura física do corpo. É a quantidade de calor que a substância troca por grama de massa durante a mudança de estado físico. É representado pela letra L. É medido em caloria por grama (cal/g).

Para calcular o calor latente é necessário utilizar a seguinte expressão:

Q = m. L - Onde Q é a quantidade de calor recebida ou cedida pelo corpo, m é a massa do corpo e L é o calor latente ou calor de transformação mássico (é a energia necessária fornecer á massa de 1Kg de substância para que mude de estado).

2.1.2 Calor específico (c)

Ao contrário da capacidade térmica, o calor específico não é característica do corpo, mas sim característica da substância. Corresponde à quantidade de calor recebida ou cedida por 1 g da substância que leva a uma variação de 14,5°C para 15,5°C na temperatura do corpo em questão. É dado pela relação da capacidade térmica do corpo pela sua massa. É representado pela letra c (minúscula) e é medido em cal/g.°C ou cal/g.K:

$$c = \frac{C}{m}$$

Onde c é o calor específico, C é a capacidade térmica e m é a massa.

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

2.1.3 – Unidades de Calor

A unidade de calor frequentemente usada no sistema métrico é a **caloria**, sendo definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 quilograma de água de 14,5°C a 15,5°C, ou no sistema inglês que é o **Btu**, sendo definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 lbm de água de 59,5 °F a 60,5 °F, tendo uma caloria o valor de 3,97 Btu, ou seja, praticamente 4 Btu.

unidades	Caloria - cal	K cal	Joule J	Quilo joule KJ	BTU
Caloria Cal	1,0	0,001	4,187	0,004187	0,003968
Kcal	1000	1,0	4186,8	4,187	3,968
Joule J	0,23884	0,00023884	1,0	0,001	0,000947817
Kj	238,846	0,238846	1000	1,0	0,947817817
BTU	251,995761	0,251995761	1055,0558	1,0550558	1,0

British Thermal Unit (BTU) = Unidade Térmica Britânica

2.1.4- TRANSFERÊNCIA DE CALOR A TEMPERATURA CONSTANTE

Considera-se como sistema 1 kg de água contida no conjunto êmbolo – cilindro da fig.4

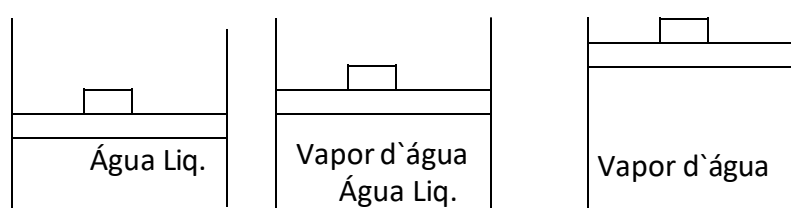


fig.4 a, b e c

Supondo-se que o êmbolo e o peso mantenham a pressão de 1,0 kg/cm² no cilindro e que a temperatura inicial seja de 15°C. À medida que é transferido calor a água, a temperatura aumenta consideravelmente, o volume específico aumenta ligeiramente e a pressão permanece constante. Quando a temperatura atinge 100°C uma transferência adicional de calor implica em uma mudança de fase como indica a Fig.4 b, isto é, parte da água líquida torna-se vapor e durante este processo, a pressão e temperatura permanece constantes, mas o volume específico aumenta consideravelmente. Quando a última porção de água líquida tiver vaporizado, uma transferência

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

adicional de calor num aumento da temperatura e do volume específico do vapor como indica a Fig. 4c.

Logo o termo temperatura de saturação designa a temperatura na qual se dá a vaporização a uma dada pressão. Esta pressão é chamada de pressão de saturação para a dada temperatura. Assim para a água a 100°C a pressão de saturação é de $1,0 \text{ kg/cm}^2$ e para a água a $1,0 \text{ kg/cm}^2$ a temperatura de saturação é 100°C . Logo a uma relação definida entre a pressão de saturação e a temperatura de saturação é mostrada na fig. 5, curva típica chamada de curva de pressão de vapor.

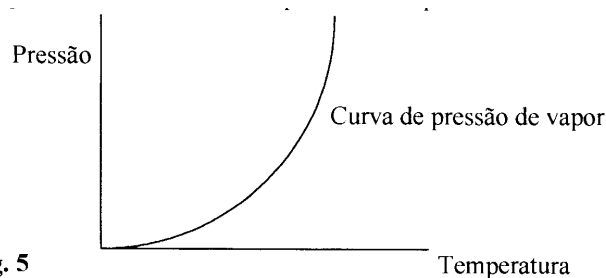


Fig. 5

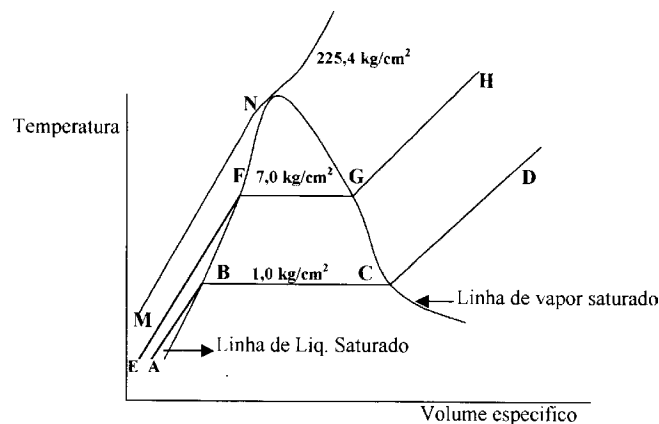


Fig.6 sem escala

Numa pressão constante de $7,0 \text{ kg/cm}^2$, começando a uma temperatura de 15°C . O ponto E e o ponto A da Fig.6 representa o estado inicial, com volume específico menor que $1,0 \text{ kg/cm}^2$ e 15°C . A vaporização tem início no ponto F, à uma temperatura de $164,2^{\circ}\text{C}$. O ponto G é o estado do vapor saturado e a linha GH tem a pressão constante no processo, no qual o vapor é superaquecido. A temperatura, pressão e volume específico do topo da curva a pressão de $225,4 \text{ kg/cm}^2$ é o ponto crítico da água, logo a temperatura crítica da água é de 374°C , pressão crítica de $225,4 \text{ kg/cm}^2$ e o volume específico é de $0,0032 \text{ m}^3/\text{kg}$. O vapor superaquecido, da início na temperatura de saturação, a pressão permanece constante e a temperatura sobe, eliminando toda água, ficando

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

somente o vapor que chamamos de vapor superaquecido. Já quando a temperatura e a pressão permanecem constante nas linhas dos pontos B e C ou nas linhas F e G , temos líquido se transformando em vapor ou temos vapor **saturado**.

2.2 – Temperatura:

A temperatura é uma propriedade macroscópica relacionada com o tacto. O sentido do tacto não permite medir a temperatura com rigor, porque é subjetivo. Os instrumentos que quantificam a temperatura sem subjetividade são os termómetros, que foram primordialmente introduzidos por Galileu Galilei (1564-1642). O funcionamento do termómetro baseia-se na Lei Zero da Termodinâmica. Esta Lei afirma que:

“Dois sistemas A e B, postos em contato, acabam por alcançar um estado de equilíbrio térmico. Se A e B estiverem, separadamente, em equilíbrio térmico com um terceiro sistema C, estarão também em equilíbrio térmico um com o outro (Guémez e Fiolhais, 1998).”

Quando dois corpos a temperaturas diferentes são colocados em contato, ocorre transferência de energia, sob a forma de calor, do corpo com uma temperatura mais elevada para o corpo de temperatura mais baixa, até ficarem ambos à mesma temperatura, atingido - se desta forma o equilíbrio térmico. Estes conceitos foram introduzidos em 1909 pelo matemático alemão Constantin Carathéodoty (1873-1950) e só mais tarde reconhecidos como lei.

Do ponto de vista microscópico, “a temperatura é apenas uma medida diferente da energia cinética média das moléculas (Gerthsen, Kneser, e Vogel, 1998).”

O físico inglês Lorde William Thomson Kelvin (1824-1907), definiu a noção de zero absoluto e estabeleceu a escala de temperatura que tem o seu nome, tendo sido adoptada oficialmente, como unidade de temperatura no Sistema Internacional, sendo representada com o símbolo K.

No entanto, a temperatura é muitas vezes medida em graus Celsius, com o símbolo °C, escala termométrica inventada pelo físico e astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744), tendo escolhido o ponto de fusão do gelo (0 °C) e o ponto de ebulição da água (100 °C) para calibrar os seus termómetros.

Para converter uma temperatura TC em °C, numa temperatura absoluta T em K, utiliza-se a seguinte relação:

$$T (K) = TC (°C) + 273,15$$

Nos Estados Unidos utiliza-se como unidade de temperatura o grau Fahrenheit de símbolo °F. Esta escala teve origem em 1714, quando Gabriel Fahrenheit (1686-1736) inventou o

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

termómetro de mercúrio. Para converter uma temperatura T_C em °C, numa temperatura T_F em °F, pode usar-se a relação:

$$T_F (°F) = T_C (°C) \times \frac{9}{5} + 32 \text{ ou } T_C (°C) = \frac{(T_F (°F) - 32) \times 5}{9}$$

A figura 1- ilustra a relação entre estas três unidades.

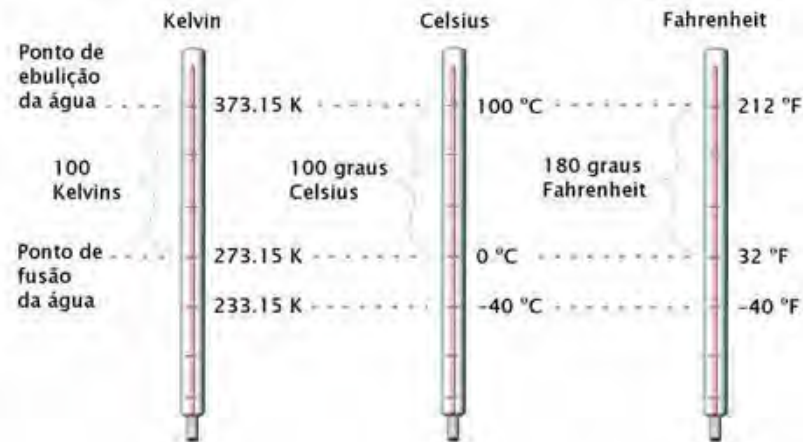


Figura 1 – Relação entre a escala Kelvin, Celsius e Fahrenheit. (Paiva et al, 2003)

Temos ainda a escala em graus Rankine

A escala **Rankine** é uma escala de temperatura assim chamada em homenagem ao engenheiro e físico escocês William John Macquorn Rankine, que a propôs em 1859. Ver a equação Rankine-Hugoniot. Como a escala kelvin, o 0R (Rankine) é o zero absoluto, mas as variações em graus Fahrenheit são utilizadas. Assim, a variação de um grau R equivale a variação de um grau F. Convertendo-se, por exemplo, 0R vale -459,67 °F. A equivalência das escalas Rankine e Kelvin é:

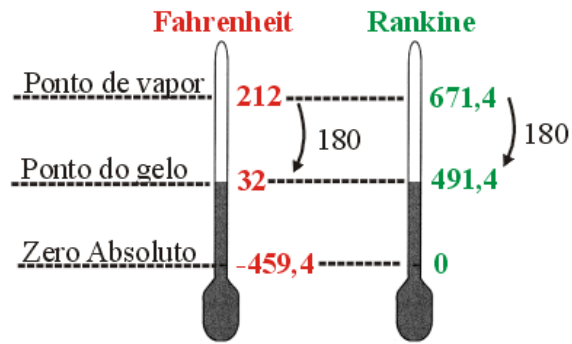
$$\text{Kelvin} - K = \text{°Ra} / 1,8$$

$$\text{Rankine} - Ra = \text{°K} \times 1,8$$

$$\text{Rankine} - Ra = \text{°F} + 459,67$$

$$\text{°F} = Ra - 459,67$$

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO



2.3- Termômetros:

São aparelhos destinados a medir a temperatura, de um gás, líquido etc.



CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

3– VAPOR

É um fluido compressível que é produzido através da transformação da água do estado líquido para o gasoso, após ela receber uma transferência de energias de um combustível. Por condensar-se de 1/1.600 de seu volume original, esta redução de volume pode gerar o vácuo. Devemos prever quebra vácuos nas instalações e tubulações, eliminadores de ar e condensado (Purgadores), projetos corretos com instalações de equipamentos adequados (Juntas de dilatação, liras, patins). A introdução de vapor bruscamente em instalações paradas e frias pode causar sérios danos como a ruptura, trinca e o choque térmico que provocará o “Golpe de Aríete” ou “Martelo Hidráulico”. Devemos ter a consciência que sempre no início ou partida de uma fábrica, o vapor pode gerar a eletricidade. Deveremos aterrar para evitar acidentes (faísca) desta natureza.

3 – TRANSMISSÃO DE CALOR

A transmissão de calor é a passagem de energia térmica (que durante o movimento recebe o nome de calor) de um corpo para o outro ou de parte de um mesmo corpo.

A transmissão de calor pode ocorrer por três processos diferentes: **condução, convecção e radiação**.

Os processos pelos quais ocorre transferência de calor (transferências de energia sob a forma de calor) são tradicionalmente divididos em:

4.1 - Condução

A condução é feita devido as moléculas de maior energia transmitirem energia através de vibrações para as partículas menos energéticas, e isto acontece porque quanto mais quente as moléculas mais vibram, isto é descrito segundo a Lei de Fourier. $q_x = -k \cdot dT/dx$ Em que: q_x é a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção de transferência em [W/m²]. k é a condutibilidade térmica que é uma propriedade de transporte característica do material em [W/m²K].

4.2 - Convecção

A convecção já não é a nível molecular como era o caso da condução. Esta já pode ser de duas formas, por convecção natural em que é devido à diferença de densidade do fluido devido ao aquecimento do fluido ou por convecção forçada em que existe um mecanismo externo ao sistema

CALDEIRAS A VAPOR - OPERAÇÃO

a forçar o movimento do fluido. Este mecanismo é segundo a Lei de Newton. $q=h(T_s-T_\infty)$ Em que: q_x é a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à superfície em $[W/m^2]$. h é o coeficiente de transferência de calor que depende das condições e natureza do escoamento, da geometria da superfície e das propriedades do fluido em $[W/m^2K]$.

4.3 - Radiação

Qualquer corpo ou superfície a uma temperatura superior ao zero absoluto emite radiação eletromagnética por alteração na configuração electrónica de átomos e moléculas. A radiação térmica está restrita aos comprimentos de onda entre 0.1 e 100 μm do espectro eletromagnético. A propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons) ocorre através de corpos ou fluidos não opacos, ou no vácuo, não precisando, portanto, da existência de matéria. A lei básica é a lei de Stefan-Boltzmann. Como se pode concluir, o transporte de energia associado a este mecanismo é qualitativamente diferente dos mecanismos referidos acima (condução e convecção). Contudo, uma vez que todas as superfícies emitem radiação térmica, e esta será tanto maior quanto mais elevada for a temperatura, se um corpo emitir mais energia do que aquela que recebe proveniente das superfícies envolventes, a temperatura desse corpo diminuirá.

5- Consumo combustível caldeira

Pode-se então calcular o consumo de combustível em uma caldeira. Por exemplo, uma caldeira que produz 150.000 kg/h de vapor, a 62 kgf/cm² (60,8 bar) e temperatura 480 °C com a água entrando a 115 °C, queimando bagaço de cana com umidade 50%, e com eficiência de 85%, o consumo de combustível (bagaço) é calculado por:

Consumo de Combustível

$$M_{bag} = \frac{[M_{vapor} \cdot (h_{vap} - h_{liq}) + M_{purga} \cdot (h_{ag} - h_{liq})]}{(efic \cdot PCi)}$$

$$M_{bag} = \frac{150.000 \cdot (806 - 115,3) + 0,03 \cdot 150.000 \cdot (294 - 115,3)}{(0,85 \cdot 1.725)}$$

$$M_{bag} = 71208,3 \text{ kg/h bagaço}$$

$$\text{relação} = 150.000 / 71208,3 = 2,11 \text{ kg vapor / kg bagaço}$$