

Instituto Educacional Less Energy

Pós-graduação
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

Frôntis  Editorial

São Paulo /SP

2024

Copyright© 2024 Instituto Educacional Less Energy

Todos direitos reservados. Proibida a tradução, versão ou reprodução, mesmo que parcial, por quaisquer processo mecânico, eletrônico, reprográfico etc., sem a autorização por escrito dos organizadores.

1ª edição - maio de 2024

Capa e coordenação editorial: Sandro Germano

Produção Editorial: *Ricardo Sterchele*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Germano, Sandro

Refrigeração industrial por amônia NH3/R717 / Sandro Germano. -- 1. ed. -- São Paulo : Frôntis Editorial, 2024.

Bibliografia.
ISBN 978-65-87013-47-3

1. Amônia 2. Energia - Desperdício 3. Refrigeração 4. Refrigeração - Manutenção e reparo I. Título.

24-207994CDD-621.56

Índices para catálogo sistemático:

1. Refrigeração industrial : Engenharia 621.56

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



e

instituto less energy

+55 (43) 3039 5377

www.lessenergy.com.br

contato@lessenergy.com.br

Sumário

MÓDULO 1
FUNDAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO

1. FUNDAMENTOS FÍSICOS 9

1.1 TEMPO 9

1.2 MASSA 9

1.3 COMPRIMENTO 9

1.4 ÁREA.10

1.5 VOLUME10

1.6 FORÇA11

1.7 MASSA ESPECÍFICA E VOLUME ESPECÍFICO11

1.8 PRESSÃO12

1.9 TEMPERATURA13

1.10 TENSÃO ELÉTRICA14

1.11 CORRENTE ELÉTRICA14

1.12 RESISTÊNCIA ELÉTRICA15

1.13 POTÊNCIA ELÉTRICA.16

1.14 FREQUÊNCIA ELÉTRICA.16

1.15 CONVERSÃO DE UNIDADES16

1.16 MECÂNICA DOS FLUIDOS17

1.17 DEFINIÇÃO DE FLUIDO17

1.18 VISCOSIDADE17

1.19 AMÔNIA COMO FLUIDO.18

1.20 TEOREMA DE STEVIN19

1.21 CINEMÁTICA E DINÂMICA DE FLUIDOS20

1.22 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE MASSA21

1.23 BERNOULLI.22

1.24 PERDA DE CARGA.24

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR 27

2.1 CALOR.28

2.2 CONDUÇÃO30

2.3 RADIAÇÃO35

2.4 CONVECÇÃO.37

3. TERMODINÂMICA 38

3.1 ENERGIA39

3.2 ENTALPIA40

3.3 DEFINIÇÃO DE ESTADO42

3.4 TÍTULO DA SUBSTÂNCIA44

3.5 DIAGRAMA PH.44

3.6 GÁS IDEAL45

3.7 EQUAÇÃO GERAL DOS GASES.45

3.8 VOLUME DE CONTROLE E MASSA DE CONTROLE46

3.9 TRABALHO46

3.10 LEI ZERO DA TERMODINÂMICA48

3.11 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA48

3.12 ENTROPIA49

3.13 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.50

3.14 CICLO DE CARNOT52

3.15 MÁQUINAS REAIS E IDEAIS54

3.16 CICLO DE REFRIGERAÇÃO55

MÓDULO 2
REFRIGERAÇÃO APLICADA

1. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO	57
1.1 COEFICIENTE DE PERFORMANCE (COP)	.58
1.2 CICLO IDEAL	.58
1.3 CICLO REAL	.60
1.4 SISTEMAS DE SIMPLES ESTÁGIO DE COMPRESSÃO.	.61
1.5 SISTEMAS DE DUPLO ESTÁGIO DE COMPRESSÃO	.62
2. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA EM SISTEMAS DE RI	63
2.1 SEPARADORES DE LÍQUIDO	.64
2.2 BOMBEAMENTO DE AMÔNIA	.65
2.3 RESFRIADORES INTERMEDIÁRIOS	.67
2.4 RESFRIADORES DE ÓLEO	.68
2.5 DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO	.68
2.6 CONDENSADORES EVAPORATIVOS	.69
2.7 EVAPORADORES	.70
3. PSICROMETRIA	71
3.1 AR	.71
3.2 LEI GERAL DOS GASES	.72
3.3 TEMPERATURAS	.72
3.4 PRESSÕES.	.74
3.5 UMIDADE.	.75
3.6 CONDENSAÇÃO.	.75
3.7 LEI DE DALTON.	.76
3.8 CARTA PSICROMÉTRICA.	.77
3.9 OPERAÇÕES PSICROMÉTRICAS	.78
3.10 MISTURA DE AR	.80
4. CARGA TÉRMICA	81
4.1 CARGA TÉRMICA DE PRODUTOS	.81
4.2 CARGA TÉRMICA POR PENETRAÇÃO	.84
4.3 CARGA TÉRMICA POR INFILTRAÇÃO	.86
4.4 CARGA TÉRMICA POR MOTORES	.89
4.5 CARGA TÉRMICA POR PESSOAS	.90
4.6 CARGA TÉRMICA POR RESPIRAÇÃO	.90
4.7 CARGA TÉRMICA POR ILUMINAÇÃO	.91
4.8 CARGA TÉRMICA POR EMBALAGENS	.91
4.9 CARGA TÉRMICA POR DEGELO	.92
5. APÊNDICE A – TABELAS TERMODINÂMICAS.	95
6. APÊNDICE B – CARTA PSICROMÉTRICA	96

MÓDULO 3
EQUIPAMENTOS E COMPONENTES DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

1. COMPRESSORES	104
1.1 COMPRESSORES ALTERNATIVOS	104
1.2 COMPRESSORES PARAFUSO	106
2. CONDENSADORES	121
2.1 CONDENSADORES À AR	122
2.2 CONDENSADORES À ÁGUA	123
2.3 TORRES DE RESFRIAMENTO.	124
3. VASOS DE PRESSÃO	135
3.1 RECIPIENTES DE LÍQUIDO	135
3.2 DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO	137
3.3 RESFRIADORES INTERMEDIÁRIOS	137
3.4 SEPARADORES DE LÍQUIDO	137
3.5 BOMBAS DE LÍQUIDO	140
4. EVAPORADORES	143
4.1 EVAPORADORES A PLACA	143
4.2 EVAPORADORES CASCO E TUBO E CASCO E SERPENTINA.	144
4.3 EVAPORADOR DE CONTATO	145
4.4 EVAPORADORES DE TUBOS LISOS	145
4.5 EVAPORADORES DE TUBOS ALETADOS.	145
4.6 CLASSIFICAÇÃO DE EVAPORADORES A AR.	147
4.7 CAPACIDADE DO EVAPORADOR	150
5. ACESSÓRIOS.	152
5.1 VÁLVULAS	152
5.2 TUBULAÇÕES	157
5.3 EXTRATORES DE AR	161
5.4 RETIFICADORES DE AMÔNIA	162
5.5 MÁQUINAS DE GELO	163
5.6 COMPONENTES ELÉTRICOS E AUTOMAÇÃO	164

MÓDULO 4
AMBIENTES FRIGORÍFICOS INDUSTRIAIS

1. AMBIENTES DE CONGELAMENTO	167
1.1 MÉTODOS DE CONGELAMENTO	168
1.2 VELOCIDADE DE CONGELAMENTO	170
1.3 TÚNEIS DE CONGELAMENTO	171
1.4 GIROFREEZERS	181
1.5 CÂMARAS FRIGORIFICADAS	183
1.6 CÂMARAS DE ESTOCAGEM DE CONGELADOS	184
1.7 PROJETO DE CÂMARAS FRIGORÍFICAS	184
1.8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CÂMARAS FRIGORÍFICAS	186
2. AMBIENTES DE RESFRIAMENTO	188
2.1 CÂMARA DE RESFRIAMENTO	188
2.2 RESFRIAMENTO DE CARCAÇAS SUÍNAS	188
2.3 RESFRIAMENTO DE CARCAÇAS BOVINAS	189
2.4 RESFRIAMENTO DE CARCAÇAS DE AVES	190
2.5 RESFRIAMENTO DE INDUSTRIALIZADOS	190
2.6 RESFRIAMENTO DE PESCADOS	191
2.7 DANOS E MODIFICAÇÕES DEVIDOS À REFRIGERAÇÃO	191
3. AMBIENTES DE CLIMATIZAÇÃO	193
3.1 NORMATIVAS	193
3.2 DESUMIDIFICAÇÃO	194
3.3 CONFORTO TÉRMICO	195
3.4 CLIMATIZAÇÃO	196
3.5 CARGAS TÉRMICAS DE CLIMATIZAÇÃO	197
3.6 SALA DE CORTES	203
4. GERAÇÃO GELO E ÁGUA GELADA	203
4.1 SELEÇÃO DE TROCADORES	204
4.2 SISTEMAS ALTERNATIVOS	205
4.3 TERMOACUMULAÇÃO	206
4.4 GERAÇÃO DE GELO	208
5. FLUIDOS DE REFRIGERAÇÃO	209
5.1 AMÔNIA	209
5.2 FLUIDOS SECUNDÁRIOS	212
5.3 COMPARATIVO ENTRE FLUIDOS	217

MÓDULO 5
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

1. EFICIÊNCIA DE COMPRESSORES	219
1.1 RENDIMENTO VOLUMÉTRICO	219
1.2 EFICIÊNCIA DE COMPRESSÃO ADIABÁTICA	223
1.3 RENDIMENTO DO COMPRESSOR EM CAPACIDADE REDUZIDA	225
1.4 INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA COMPRESSORES	225
1.5 LEI DOS VENTILADORES	226
1.6 SISTEMA DE CONTROLE MESTRE ESCRAVO	227
4.7 CONTROLE DO VOLUME INTERNO DE COMPRESSORES PARAFUSO	230
4.8 COP DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO	232
4.9 CONSUMO IDEAL E CONSUMO REAL	233
4.10 SISTEMAS DE COMPRESSÃO EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS	234
5. EFICIÊNCIA DE CONDENSADORES	240
5.1 CÁLCULO DA CAPACIDADE REAL E EFICIÊNCIA	241
5.2 INFLUÊNCIA DA TBS E TBU	241
5.3 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR E ÁGUA	243
5.4 INFLUÊNCIA DAS TUBULAÇÕES E INSTALAÇÕES MECÂNICAS	244
5.5 PRESSÃO DE CONDENSAÇÃO IDEAL	247
6. EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL	247
6.1 INFLUÊNCIA DO SUPERAQUECIMENTO	247
6.2 INFLUÊNCIA DO SUBRESFRIAMENTO	250
6.3 ALIMENTAÇÃO DE LÍQUIDO EM CASCATA	251
6.4 EFICIÊNCIA EM EVAPORADORES INUNDADOS	252
6.5 SISTEMAS IMPUROS	254
6.6 ANÁLISE ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE DEGELO	259
6.7 ANÁLISE ENERGÉTICA DE DESSUPERAQUECIMENTO	261

MÓDULO 6

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA À REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

1. GESTÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.	262
1.1 INDICADORES TÉCNICOS	264
1.2 INDICADORES MEIO.	266
3.3 GESTÃO DE CONSUMO DE ENERGIA	270
11.4 FERRAMENTAS DE GESTÃO	272
12.ANÁLISE TERMoeCONômICA	276
12.1 PAYBACK SIMPLES.	276
12.2 PAYBACK COMPOSTO.	276
12.3 TAXA DE ATRATIVIDADE	277
12.4 RETORNO SOBRE INVESTIMENTO (ROI).	277
12.5 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR).	278
12.6 CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA	278
12.7 CONVERSÃO DE ENERGIA	279
13.PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	281
13.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DA INSTALAÇÃO.	282
13.2 BALANÇO ENERGÉTICO.	285
13.3 ANÁLISE ENERGÉTICA	290
13.4 CAUSAS E PLANO DE AÇÃO.	295
13.5 ANÁLISE TÉCNICA E IMPACTO NOS INDICADORES.	295
13.6 ANÁLISE ECONômICA	295
13.7 ANÁLISE AMBIENTAL	298
14.BENEFÍCIOS AMBIENTAIS EM PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.	298
14.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO ECONômICO VIGENTE	298
14.2 FONTES DE ENERGIA NÃO-RENOVÁVEIS.	299
14.3 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS	300
14.4 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E MUNDIAL	302
14.5 EMPREENDIMENTOS ENERGÉTICOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS	304
14.6 AQUECIMENTO GLOBAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.	307
14.7 SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.	310
14.8 ECONOMIA VERDE E ECONOMIA AMBIENTAL	311
14.9 REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA	312
14.10 E.E EM ECOSISTEMAS FIXADORES DE CARBONO	314
14.11 REDUÇÃO DA DEMANDA HÍDRICA	315
14.12 ASPECTOS LEGAIS EM PROJETOS DE E.E.	317
14.13 CONCLUSÃO.	319
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	320

Módulo 1

FUNDAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO

1. FUNDAMENTOS FÍSICOS

Toda grandeza física deve ser caracterizada por suas dimensões. As magnitudes atribuídas às dimensões são chamadas de unidades. Algumas dimensões básicas como massa (m), comprimento (L), tempo (t) e temperatura (T) são designadas como dimensões primárias ou fundamentais, enquanto outras como velocidade (Vel), energia (E) e volume (V) são expressas em função das dimensões primárias e chamadas de dimensões secundárias ou dimensões derivadas (ÇENGEL, 2013).

1.1 TEMPO

O tempo é uma grandeza física muito comum e recorrente em nosso cotidiano e, de modo geral, pode ser definida como a ordem de ocorrência de eventos naturais.

A unidade básica de tempo é o segundo, dada por “s”, ao qual é definido como a duração de 9.192.631.770 ciclos de radiação associada a uma transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133.

A tabela 1.1 apresenta as demais unidades de tempo e suas respectivas conversões.

Tabela 1.1 - Conversão de unidades de tempo

	Segundo (s)	Minuto (min)	Hora (h)
Segundo (s)	1	0,016666	0,000277
Minuto (min)	60	1	0,016666
Hora (h)	3600	60	1

Fonte: Less Energy (2021).

1.2 MASSA

A massa é uma grandeza física que representa a quantidade de matéria de um corpo. A unidade básica de massa no SI é o quilograma, dado em “kg”. Mas, também pode ser encontrada utilizando-se múltiplos ou submúltiplos, como g, mg, Mg, Ton entre outros.

O kg é estabelecido fixando-se o valor numérico da constante de Planck, “h”, exatamente igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quando expresso em unidades do SI, $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, que é igual a joule segundo (J·s).

1.3 COMPRIMENTO

O comprimento é a grandeza física que expressa a distância entre dois pontos. A palavra comprimento é sinônima de distância e é comum utilizar o símbolo “L” para representá-la. O comprimento é considerado habitualmente como uma das grandezas físicas fundamentais, por isso não pode ser definido em termos de outras magnitudes que se podem medir.

Há diferentes unidades de medida que são usadas para medir o comprimento, mas no Sistema Internacional de Unidades (SI) a unidade básica do comprimento é o metro (m).

Na engenharia e na refrigeração, são utilizados tanto o sistema internacional quanto o sistema inglês. No primeiro, costuma-se utilizar o milímetro (mm), para pequenas distâncias e comprimentos de objetos, conseguindo medir com mais precisão através de instrumentos de medição como paquímetros e micrômetros. O metro geralmente é utilizado para medir grandes distâncias, como em obras civis ou comprimentos de tubulações. A unidade do sistema inglês mais utilizada dentro do campo de aplicação da refrigeração é a polegada (in).

Tabela 1.2 - Conversão de unidades de massa

	miligrama (mg)	grama (g)	quilograma (kg)	Tonelada (t)	Libra (lb)
miligrama (mg)	1	0,001	0,000001	0,000000001	0,0000022046
grama (g)	1.000	1	0,001	0,000001	0,0022046
quilograma (kg)	1.000.000	1000	1	0,001	2,2046
Tonelada (t)	1.000.000.000	1.000.000	1.000	1	2204,6
Libra (lb)	453.592	453,592	0,453592	0,000453592	1

Fonte: Less Energy (2021).

Ela é aplicada para mensurar distâncias de pequenos componentes, tipos de roscas, parafusos e principalmente para diâmetros de tubulações, sendo a principal referência neste segmento.

Se define ao fixar o valor numérico da velocidade da luz no vácuo, “c”, em 299 792 458, quando se expressa a unidade em m.s⁻¹, onde o segundo é definido em função da frequência de césio, ΔνCs.

Figura 1.1 - Distância entre dois pontos



Fonte: Less Energy (2021).

1.4 ÁREA

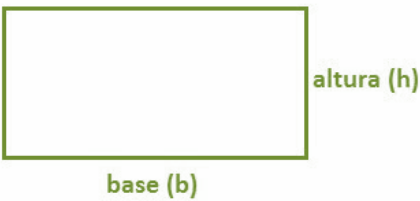
A área é um conceito matemático definido como a quantidade de espaço bidimensional ou de superfície. Existem várias unidades de medida de área, sendo a mais utilizada o metro quadrado (m²) e os seus múltiplos e submúltiplos.

Cada unidade de comprimento tem uma unidade de área correspondente, igual à área do quadrado, cujo lado é esse comprimento. Desta forma, as áreas podem ser medidas em metros quadrados (m²), centímetros quadrados (cm²), milímetros quadrados (mm²), quilômetros quadrados (km²), polegadas quadradas (in²), e assim por diante. Algebricamente, estas unidades são os quadrados das unidades de comprimento correspondentes.

A área de cálculo mais simples é a do retângulo, onde multiplica-se os lados (ou base x altura) sendo,

AR = b x h (1.1)

Figura 1.2 - Área do retângulo

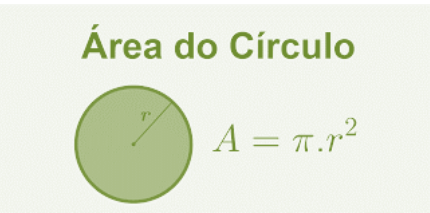


Fonte: Less Energy (2021)

Já para as circunferências (círculos), em nosso caso para área transversal de tubulações, a área é definida pela equação 1.2, utilizando-se o raio sendo,

Ac = π x r² (1.2)
Onde 'Ac' é a área do círculo e 'r' o raio da circunferência.

Figura 1.3 - Área do círculo



Fonte: Less Energy (2021).

Tabela 1.3 - Conversão de unidades de área

	m²	cm²	mm²	in²
metro quadrado (m²)	1	10000	1.000.000	1550
centímetro quadrado (cm²)	0,0001	1	100	0,1550
milímetro quadrado (mm²)	0,000001	0,01	1	0,00155
polegada quadrada (in²)	0,00064516	6,4516	645,16	1

Fonte: Less Energy (2021).

É muito comum e mais usual obtermos os diâmetros das tubulações ao invés de seus raios. Portanto, sabendo-se que o valor do raio é metade do valor do diâmetro (r = D/2), substituindo na equação 1.2, obtém-se o cálculo da área da circunferência em função do diâmetro, conforme equação 1.3:

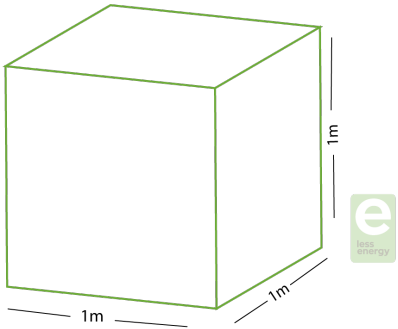
Ac = (π x D²) / 4 (1.3)

Onde 'Ac' é a área do círculo e 'D' o diâmetro da circunferência. Em muitos casos ainda é necessário encontrar o diâmetro em função da área. Para isso basta isolar o diâmetro na equação 1.3.

D = √(4 x Ac / π) (1.4)

1.5 VOLUME

Figura 1.4 - Volume de um cubo



Fonte: Less Energy (2021)

O volume é definido como o espaço ocupado por um corpo ou a capacidade que ele tem de comportar alguma substância. Da mesma forma que trabalhamos com o metro linear (comprimento) e com o metro quadrado (comprimento x largura), associamos o metro cúbico a três dimensões: altura x comprimento x largura. Desta forma, o volume de um cubo será:

V = L x h x C (1.5)
Onde 'V' é volume, 'L' a largura, 'h' altura e 'C' o comprimento.

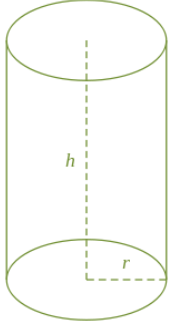
Já para um cilindro, o volume é definido como a área da base multiplicado pelo comprimento total, sendo a base uma circunferência, representada como:

V = Ac x h = π x r² x h = (π x D² x h) / 4 (1.6)

Onde 'V' é volume, 'r' o raio, 'D' o diâmetro e 'h' a altura.

Desta forma, é possível determinar qual o volume interno de um trecho de tubulação ou de um vaso de pressão de amônia, por exemplo.

Figura 1.5 - Volume de um cilindro



Podemos ver as relações de escala por unidade de volume na tabela 1.4.

A unidade de volume no Sistema Internacional de Unidades (SI) e mais usual na refrigeração industrial é o metro cúbico (m³). Porém, no dia a dia é comum encontrarmos volumes expressos na unidade de litros (l). Basta saber que 1 m³ = 1.000 l.

1.6 FORÇA

Força é um dos conceitos fundamentais da mecânica clássica. Relacionado às três leis de Newton, é uma grandeza que tem a capacidade de vencer a inércia de um corpo modificando a velocidade seja na sua magnitude ou direção, já que se trata de um vetor.

Em resumo, força pode ser definida como: “qualquer agente externo que modifica o movimento de um corpo livre ou causa deformação num corpo fixo”.

A unidade de força utilizada no sistema internacional recebe o nome do autor, Newton, dada por “N”, e é definida pelas unidades básicas de massa, comprimento e tempo. A segunda lei de Newton estabelece que a força líquida que age em um corpo é proporcional ao produto da massa pela aceleração. O Newton é definido de forma que a constante de proporcionalidade na expressão seja igual a unidade. Dessa forma, a segunda lei de Newton é expressa pela equação 1.7.

F = m x a (1.7)

Onde 'F' é a força (N), 'm' a massa (kg) e 'a' a aceleração em (m/s²).

Define-se que 1 N é a força necessária para acelerar uma massa de 1 kg a uma taxa de 1 metro por segundo a cada segundo ou uma aceleração de 1 m/s².

1 (N) = 1 (kg) * 1 (m/s²) (1.8)

1.7 MASSA ESPECÍFICA E VOLUME ESPECÍFICO

A massa específica, comumente conhecida como densidade, é definida como a relação entre a massa e o volume de uma determinada substância.

p = m/V (1.9)

Onde 'p' é a massa específica (kg/m³), 'm' é a massa (kg) e 'V' o volume (m³).

O inverso da massa específica (densidade) é denominado volume específico, que é a quantidade de volume ocupada por unidade de massa, dada pela equação 1.10.

v = V/m (1.10)

Onde 'v' é o volume específico (m³/kg), 'm' a massa (kg) e 'V' o volume (m³).

Geralmente, a densidade de uma substância é dependente da temperatura e da pressão. A densidade dos gases é proporcionalmente relacionada a pressão e inversamente proporcional ao volume. Os líquidos e sólidos são substâncias essencialmente incompressíveis, isto é, não possuem variações significativas de densidade com o tempo e pressão, dependendo muito mais da temperatura.

1.7.1 PESO ESPECÍFICO

O peso específico de um fluido é definido como sendo o peso por unidade de volume.

γ = P/V = (m x g) / V = ρ x g (1.11)

Onde 'γ' é o peso específico (N/m³), 'P' o peso (N), 'V' o volume (m³), 'm' a massa (kg), 'g' a aceleração da gravidade e 'ρ' a massa específica.

Outro peso específico usual é o peso específico relativo que representa a relação entre o peso específico do fluido em estudo e o peso específico da água.

γr = γ / γH2O

Onde 'γ' é o peso específico do fluido (N/m³), 'γH2O' o peso específico da água (N/m³) e 'γr' o peso específico relativo.

Tabela 1.4 - Conversão de unidades de volume

	m³	cm³	l	ft³	in³
metro cúbico (m³)	1	1000000	1000	35,31	61020
centímetro cúbico (cm³)	0,000001	1	0,001	0,00003531	0,06102
litro (l)	0,001	1000	1	0,03531	61,02
pé cúbico (ft³)	0,02832	28320	28,32	1	1728
polegada cubica (in³)	0,00001639	16,39	0,01639	0,0005787	1

Fonte: Less Energy (2021).

1.8 PRESSÃO

A força normal exercida por um fluido por unidade de área é denominada pressão, sendo que, para sólidos, o termo equivalente é denominado tensão normal.

Considere duas pessoas sob a neve. A primeira pessoa está caminhando sob a neve utilizando um par de botas e a outra está caminhando sob uma prancha de ski. Como a área de contato da bota com a neve é menor do que a da prancha de ski e a tensão normal (pressão) é inversamente proporcional à área, a pessoa que está caminhando com a bota exercerá uma tensão (pressão) maior na neve do que a pessoa que está com uma prancha de ski, tendendo a afundar seus pés.

Tanto a pressão quanto a tensão normal podem ser obtidas pela equação 1.12.

P = F/A (1.12)

Onde 'P' é a pressão ou tensão normal (Pa), 'F' é a força normal (perpendicular) a área de contato (N) e 'A' a área de contato (m²).

A pressão tem como unidade o newton por metro quadrado (N/m²), a qual é denominada pascal (Pa). Portanto,

1 Pa = 1 N/m² (1.13)

A unidade Pascal é muito pequena para quantificar as pressões encontradas na prática, sendo normalmente utilizados seus múltiplos quilopascal (1kPa = 10³ Pa) e megapascal (1MPa = 10⁶ Pa). Outras unidades de pressão são utilizadas na prática, sendo as mais comuns: bar, atmosfera padrão (atm) e quilograma-força por centímetro quadrado (kgf/cm²). Tais unidades são relacionadas da seguinte forma:

1 bar = 105 Pa = 0,1 MPa = 100 kPa (1.14)

1 atm = 101,325 Pa = 1,01235 bar (1.15)

1 kgf/cm² = 0,9679 atm (1.16)

A pressão real em determinada posição é denominada pressão absoluta, sendo medida com relação ao vácuo (pressão absoluta zero). Porém, a maioria dos dispositivos medidores de pressão realizam a medição com o valor zero adotado na atmosfera, indicando a diferença entre pressão absoluta e a pressão atmosférica local, sendo essa diferença de pressão denominada pressão manométrica ou relativa. Pressões abaixo da pressão atmosférica são chamadas de pressão de vácuo e são medidas pelos medidores de

vácuo que indicam a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão absoluta. Todos os tipos de pressão são quantidades positivas e estão relacionadas entre si pela equação 1.17, 1.18 e figura 1.7 (ÇENGEL, 2013).

P_{man} = P_{abs} - P_{atm} (1.17)

Onde 'P_{man}' é a pressão manométrica (Pa), a 'P_{abs}' é a pressão absoluta (Pa) e a 'P_{atm}' é a pressão atmosférica (Pa).

P_{vácuo} = P_{atm} - P_{abs} (1.18)

Onde 'P_{vácuo}' é a pressão de vácuo (Pa), a 'P_{abs}' é a pressão absoluta [Pa] e a 'P_{atm}' é a pressão atmosférica [Pa].

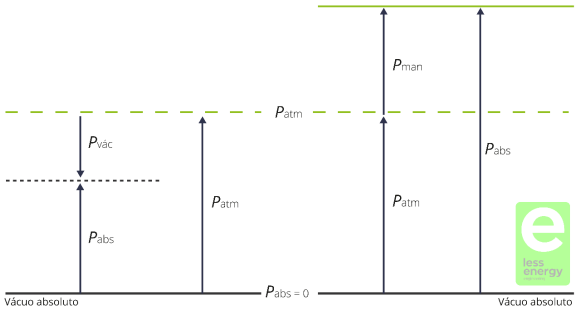
GRANDES CIENTISTAS

Isaac Newton (04/01/1643-31/03/1727) foi um físico, matemático, astrônomo, filósofo, teólogo e cientista inglês, sendo considerado um dos maiores nomes da história da ciência. Em 1687, publicou a obra “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, descrevendo a lei da gravitação universal e as três leis de Newton, fundamentando a mecânica clássica. Seu trabalho é muito vasto e de grande importância para a humanidade, tendo elaborado o primeiro telescópio refletor, desenvolvido uma lei empírica para o resfriamento, além de sua contribuição para estudos sobre a velocidade do som e cálculo infinitesimal.

GRANDES CIENTISTAS

Blaise Pascal (19/06/1623 – 19/08/1662) foi um pesquisador, físico, matemático, teólogo e filósofo francês. Foi o responsável pela invenção da primeira calculadora, além de enorme contribuição no campo da matemática pelo triângulo de Pascal, e da física, por estudos que resultaram no princípio de Pascal, ao qual esclarece o conceito de pressão.

Figura 1.6 - Relação entre pressões



Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013).

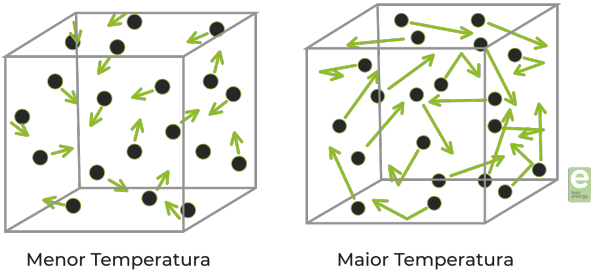
ATENÇÃO

Embora exista diferença entre a pressão absoluta e a pressão manométrica, observa-se uma grande confusão na indústria em relação a qual tipo de pressão medir e adotar. Deve-se levar em consideração a finalidade da medição, se é requisitado a pressão manométrica ou absoluta e sempre a indicação de qual tipo de medição é realizada. A pressão absoluta é utilizada como parâmetro de medição em evacuação e vazamento de sistemas de refrigeração, monitoramento da qualidade do ar e quando se deseja evitar a influência da variação da pressão atmosférica. Em outras aplicações, geralmente utiliza-se como parâmetro a pressão manométrica. Uma designação comum para diferenciar pressão manométrica de pressão absoluta são os índices “g” e “a” após a unidade de medida de pressão, em que “g” significa manométrica (gauge) e “a” absoluta, por exemplo: 2 bar(g) e 2 bar(a). É importante frisar que as tabelas termodinâmicas e alguns softwares para aquisição de propriedades fornecem pressão absoluta.

1.9 TEMPERATURA

A temperatura é uma grandeza física escalar que pode ser definida como a medida do grau de agitação das moléculas que compõem um corpo. A temperatura revela a noção do que é quente ou frio. Macroscopicamente, a temperatura está associada ao movimento aleatório das substâncias que compõem o sistema. Quanto maior a frequência de vibração dos átomos do sistema, maior é sua temperatura.

Figura 1.7 - Temperatura



Fonte: Less Energy (2021).

Tabela 1.5 - Conversão de unidades de pressão

Unidade	atm	kPa	bar	Pa	mmHg	mH ₂ O	kgf/cm²
atm	1	101,325	1,01325	101325	760	10,33	1,033
kPa	9,869×10-3	1	0,01	1000	7,501	0,102	0,0102
bar	0,9869	100	1	100000	750,1	10,2	1,02
mbar	9,869×10-4	0,1	0,001	100	0,7501	1,02×10-2	1,02×10-3
mmHg	1,316×10-3	0,1333	1,333×10-3	133,3	1	1,36×10-2	1,36×10-3
mH ₂ O	9,678×10-2	9,806	9,807×10-2	9806	73,56	1	0,1
kgf/cm²	0,968	98,1	0,981	98100	735,56	10	1

Fonte: Less Energy (2021).

A temperatura é a propriedade que governa o processo de transferência de calor entre sistemas ou corpos, afinal só há transferência de calor quando há diferenças de temperatura entre eles. Dois sistemas estão em equilíbrio térmico quando suas temperaturas são iguais, isto é, não existe transferência de calor. Caso exista uma diferença de temperaturas entre os sistemas, o calor fluirá do sistema mais quente para o mais frio, até que se restabeleça o equilíbrio térmico. Quanto mais se adiciona calor a um sistema, maior sua temperatura, assim como a retirada de calor de um sistema implica na diminuição de sua temperatura.

A lei zero da termodinâmica declara que se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então eles também estão em equilíbrio térmico entre si. Tal fato serve como base para a validação da medição da temperatura.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade básica de temperatura é o Kelvin (K), definido como sendo (1/273,15) da temperatura do ponto triplo da água, isto é, a temperatura no qual a água pode estar, em equilíbrio, nos estados sólido, líquido e gasoso. Quando as moléculas do corpo estão em repouso (vibração nula), se atinge a menor temperatura em que um corpo pode estar no universo, temperatura a qual é definida como zero absoluto e possui o valor de 0 K, o seu valor é estabelecido no novo sistema internacional fixando-se o valor numérico da constante de Boltzmann exatamente igual a 1,380 649 ×10⁻²³ quando expresso em unidades do SI, m²·kg·s⁻²·K⁻¹, que é igual a (J·K⁻¹).

A escala de temperatura em graus Celsius (°C) é a escala mais utilizada no Brasil e na maioria dos países signatários da Convenção do Metro (França-1875), na qual 0 °C se refere a temperatura de congelamento da água e 100 °C é a temperatura de ebulição da água na pressão atmosférica ao nível do mar.

Tanto na escala Kelvin (K) quanto na escala Celsius (°C) a diferença de temperatura é a mesma, isto é, a diferença de temperatura de 1 K é igual a diferença de temperatura de 1 °C.

Nos países de língua inglesa, em especial os EUA, as escalas Rankine (°R) e Fahrenheit (°F) são ainda muito utilizadas. Da mesma forma da escala Kelvin, a escala Rankine (°R) tem o valor de 0 °R como sendo o valor de zero absoluto. A escala Fahrenheit (°F) é comumente utilizada no dia a dia nos países de língua inglesa, sendo que a diferença de temperatura de 1 °F é igual a diferença de temperatura de 1 °R.

Os valores de zero absoluto, fusão do gelo e ebulição da água ao nível do mar são representados na tabela 1.6, tanto para os valores de escala relativa (Celsius (°C) e Fahrenheit (°F)) quanto para as escalas absolutas (Kelvin (K) e Rankine (°R)).

Tabela 1.6 - Temperaturas de zero absoluto, fusão e ebulição da água ao nível do mar.

Temperatura	Escalas relativas		Escalas absolutas	
	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)	Kelvin (K)	Rankine (°R)
Zero absoluto	-273,15	-460	0	0
Fusão do gelo	0	32	273,15	492
Ebulição da água	100	212	373,15	672

Fonte: Less Energy (2021).

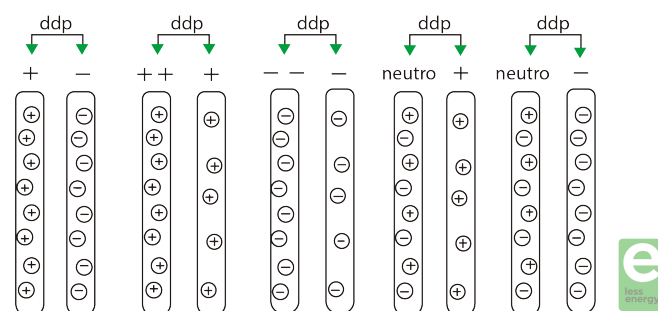
A equivalência entre as escalas termométricas pode ser representada pelas relações da equação 1.19.

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{5} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{9} = \frac{\text{K} - 273,15}{5} = \frac{^{\circ}\text{R} - 492}{9} \quad (1.19)$$

1.10 TENSÃO ELÉTRICA

Quando se compara a quantidade de energia armazenada por dois corpos eletrizados, automaticamente está se comparando os seus potenciais elétricos. A diferença entre essa quantidade de carga armazenada expressa diretamente a diferença de potencial elétrico entre esses dois corpos. Comumente conhecida como “ddp”, a diferença de potencial elétrico existe entre corpos eletrizados com cargas diferentes ou com o mesmo tipo de carga.

Figura 1.8 - Tensão elétrica



Fonte: Adaptado de apostila de sistemas elétricos – SENAI SP (2008)

A “ddp” também é denominada tensão elétrica, importantíssima nos estudos relacionados à eletricidade e à eletrônica. No campo da eletrônica e da ele-

tricidade, utiliza-se exclusivamente a palavra tensão para indicar a ddp ou tensão elétrica.

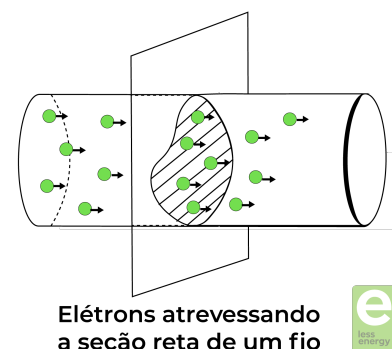
A tensão elétrica entre dois pontos pode ser medida por meio de instrumentos como o voltímetro. A unidade de medida de tensão é o volt, que é representado pelo símbolo V. Como qualquer outra unidade de medida, o Volt também tem múltiplos e submúltiplos adequados a cada situação. Geralmente, a tensão elétrica de indústrias frigoríficas é de 380 V, em sistemas trifásicos. Nas residências adota-se tensões de 127 ou 220 V, dependendo da região do país e da quantidade de fases da rede elétrica.

Ao associarmos o conceito da tensão elétrica com a mecânica dos fluidos, assemelhamos a tensão com a pressão. Neste caso, mesmo o sistema permanecendo estático, (sem corrente elétrica) haverá tensão elétrica, e na mecânica dos fluidos, mesmo sem escoamento do fluido haverá pressão (energia de pressão e potencial).

1.11 CORRENTE ELÉTRICA

A corrente elétrica consiste em um movimento orientado de cargas provocado pela diferença de potencial elétrico (ddp) entre dois pontos. A corrente elétrica é a forma pela qual os corpos eletrizados procuram restabelecer o equilíbrio elétrico. Para que haja corrente elétrica, é necessário que haja tensão elétrica e que o circuito esteja fechado. Logo, pode-se afirmar que existe tensão sem corrente, mas nunca existirá corrente sem tensão. Isso acontece porque a tensão orienta as cargas elétricas. O símbolo para representar a intensidade da corrente elétrica é a letra “I”. Ao associarmos o conceito da corrente elétrica com a mecânica dos fluidos, assemelhamos a corrente ao fluxo de massa de um fluido em escoamento por uma tubulação.

Figura 1.9 - Corrente elétrica

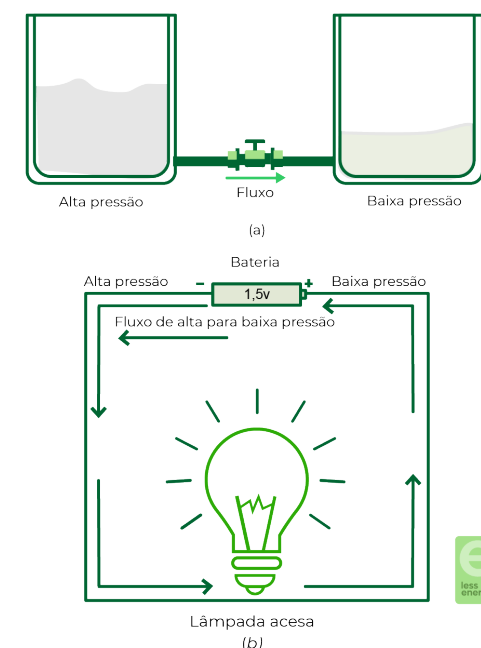


Fonte: Adaptado de apostila de sistemas elétricos – SENAI SP (2008)

Corrente elétrica é uma grandeza física e por isso pode ter sua intensidade medida por meio de instrumentos de medição como o amperímetro. A unidade de medida da intensidade da corrente elétrica é o ampère, que é representado pela letra A. Na eletrônica

e na automação é comum encontrar também o submúltiplo do ampère, o miliampere, muito utilizado para comunicação e sistemas de controle analógicos, sendo 1 A = 0,001 mA.

Figura 1.10 - Corrente elétrica associada à mecânica



Fonte: Adaptado de apostila de sistemas elétricos – SENAI SP (2008)

A corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas. Nos materiais sólidos, as cargas que se movimentam são os elétrons; nos líquidos e gases o movimento pode ser de elétrons ou íons positivos. Quando o movimento de cargas elétricas formadas por íons ou elétrons ocorre sempre em um sentido, a corrente elétrica é chamada de corrente contínua e é representada pela sigla CC ou DC (direct current). Já quando há alternância na direção do fluxo de elétrons a corrente elétrica é designada por alternada, representada por CA ou AC (alternating current).

1.12 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência elétrica é a propriedade de um condutor que tende a se opor, ou restringir, o fluxo de uma corrente elétrica e está presente em todos os circuitos.

A resistência pode ser denominada fricção elétrica, porque afeta o movimento dos elétrons de forma semelhante ao efeito da fricção em objetos mecânicos. Por exemplo, se o interior de uma tubulação de água está com alta rugosidade, por causa da ferrugem ou algum outro material, um fluxo menor de água vai fluir através do tubo, em uma determinada pressão, em relação ao fluxo no interior do tubo limpo e liso. A tubulação rugosa oferece maior resistência ou fricção do que a tubulação lisa.

A unidade usada na eletricidade para mensurar a resistência é o ohm, nome dado em homenagem ao

físico alemão Georg S. Ohm (1789-1854), que descobriu a relação entre grandezas elétricas conhecida como lei de Ohm. A resistência é a oposição ao fluxo de corrente e é simbolizada pela letra “R”, medida em ohms, cujo símbolo é a letra grega ômega Ω.

Materiais isolantes são os que apresentam forte oposição à circulação de corrente elétrica no interior de sua estrutura. Isso acontece porque os elétrons livres dos átomos que compõem a estrutura química dos materiais isolantes são fortemente ligados a seus núcleos e dificilmente são liberados para a circulação. Já os materiais condutores caracterizam-se por permitirem a existência de corrente elétrica toda a vez que se aplica uma ddp (diferencial de potencial) entre suas extremidades. Eles são empregados em todos os dispositivos e equipamentos elétricos e eletrônicos.

A resistividade elétrica é a resistência elétrica específica de um certo material ou condutor considerando 1 metro de comprimento e 1 mm² de área de seção transversal, medida em temperatura ambiente constante de 20 °C. Simbolizada por “ρ”, medida em Ωm ou Ωmm²/m, cujo o símbolo é o “ρ”, letra grega rho (rô).

A segunda lei de Ohm afirma que a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional ao produto da resistividade específica pelo seu comprimento, e inversamente proporcional à sua área de seção transversal.

$$R = \frac{\rho \times L}{A} \quad (1.20)$$

Onde R é a resistência elétrica (Ω), L o comprimento do condutor (m), 'A' a área de seção transversal do condutor (mm²) e 'ρ' a resistividade elétrica do material (Ωmm²/m).

A lei de Ohm estabelece uma relação entre as grandezas elétricas: tensão (V), corrente (I) e resistência (R) em um circuito. Verifica-se a Lei de Ohm a partir de medições de tensão, corrente e resistência realizadas em circuitos elétricos simples, compostos por uma fonte geradora e um resistor. A partir daí, Ohm define a primeira lei de forma matemática como sendo:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1.21)$$

Onde 'R' é a resistência elétrica (Ω), 'I' a corrente elétrica (A) e 'V' a tensão elétrica (V).

Para que as equações decorrentes da Lei de Ohm sejam utilizadas, os valores das grandezas elétricas devem ser expressos nas unidades fundamentais:

- Volt (V) ➡ tensão elétrica
- ampère (A) ➡ corrente elétrica
- ohm (Ω) ➡ resistência elétrica

1.13 POTÊNCIA ELÉTRICA

Ao passar por uma carga instalada em um circuito, a corrente elétrica produz, entre outros efeitos, calor, luz e movimento. Esses efeitos são denominados de trabalho. O trabalho de transformação de energia elétrica em outra forma de energia é realizado pelo consumidor ou pela carga. Ao transformar a energia elétrica, o consumidor realiza um trabalho elétrico. O tipo de trabalho depende da natureza do consumidor de energia. Um aquecedor, por exemplo, produz calor; uma lâmpada, luz; um ventilador, movimento.

A capacidade de cada consumidor produzir trabalho, em determinado tempo, a partir da energia elétrica é chamada de potência elétrica, representada pela seguinte fórmula:

P = τ / t (1.22)

Onde 'P' é a potência (W), 'τ' o trabalho (J) e 't' o tempo (s).

A unidade de medida da potência elétrica é o watt, simbolizado pela letra W. Um watt (1W) corresponde à potência desenvolvida no tempo de um segundo em uma carga, alimentada por uma tensão de 1 V, na qual circula uma corrente de 1 A.

A potência elétrica de um consumidor depende da tensão aplicada e da corrente que circula nos seus terminais. Para sistemas em corrente contínua, essa relação é representada pela equação 1.23.

P = V x I (1.23)

Onde 'P' é a potência elétrica [W], a 'V' tensão elétrica [V] e 'I' corrente elétrica [A].

Já em sistemas trifásicos, a potência elétrica é representada pela equação 1.24.

P = V x I x √3 x cosφ x η (1.24)

Onde 'P' é a potência elétrica (W), 'V' a tensão elétrica (V), 'I' a corrente elétrica (A), 'cosφ' o fator de potência e 'η' o rendimento do motor elétrico.

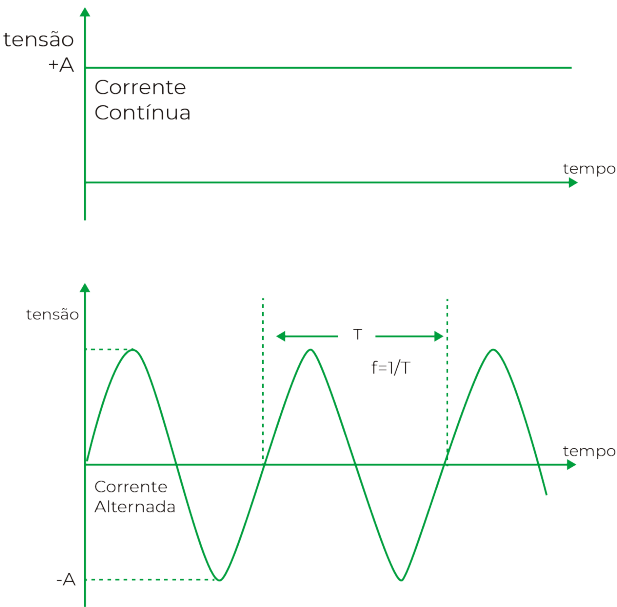
1.14 FREQUÊNCIA ELÉTRICA

Para entender o conceito de frequência é necessário o entendimento prévio da corrente elétrica, já estudada neste módulo. A corrente elétrica está dividida em dois grupos, a corrente contínua (DC) e a corrente alternada (AC).

Na corrente contínua, o fluxo de elétrons passa pelo condutor em um único sentido, indo, ou do polo positivo (+) para o negativo (-), ou do polo negativo (-) para o positivo (+), desta forma, o fluxo de corrente é único e nunca será alterado.

Já na corrente alternada, os polos positivos (+) e negativos (-) se invertem durante todo o tempo, sendo, ora positivo, ora negativo, e seguindo essa ordem durante todo o período de fluxo de corrente elétrica

Figura 1.11 - Diferença entre corrente contínua e alternada



Fonte: Less Energy (2021)

A quantidade de oscilações de polaridade que acontecem em determinado período de tempo é chamada de frequência elétrica.

Por definição, a frequência elétrica é a frequência nominal das oscilações de corrente alternada em uma rede síncrona de transmissão de uma usina elétrica ao consumidor. Na maior parte do mundo, a frequência é de 50 Hz, embora em boa parte das Américas e em alguns países da Ásia essa frequência tipicamente seja de 60 Hz.

No Brasil utilizamos a frequência de 60 Hz, isto significa que a polaridade da rede elétrica oscila 60 vezes em um segundo.

A frequência elétrica é uma grandeza dada em Hertz (Hz), em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). Matematicamente a frequência pode ser definida como:

F = 1 / t (1.25)

Onde F é a frequência (Hz) e t o tempo para a onda completar uma oscilação completa (s)

1.15 CONVERSÃO DE UNIDADES

Tabela 1.7 - Múltiplos

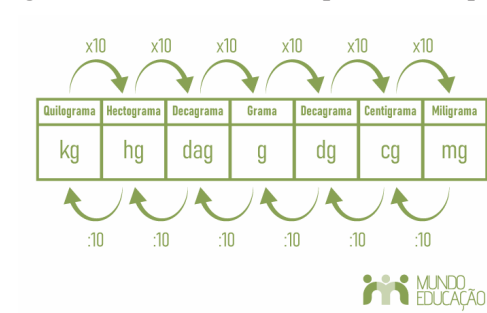
Designação do Prefixo	Fator Multiplicador	Símbolo do Prefixo
exa	10 ¹⁸	E
peta	10 ¹⁵	P
tera	10 ¹²	T
giga	10 ⁹	G
mega	10 ⁶	M
quilo	10 ³	K
hecto	10 ²	h

Tabela 1.8 - Submúltiplos

Designação do Prefixo	Fator Multiplicador	Símbolo do Prefixo
deci	10 ⁻¹	d
centi	10 ⁻²	c
mili	10 ⁻³	m
micro	10 ⁻⁶	μ
nano	10 ⁻⁹	n
pico	10 ⁻¹²	p
fento	10 ⁻¹⁵	f

Ao longo do nosso curso, iremos nos deparar com diversas grandezas físicas e suas respectivas unidades, para isso é importante relembrar algumas conversões de múltiplos e submúltiplos dessas unidades.

Figura 1.12 - Conversão de múltiplos e submúltiplos



Fonte: Mundo Educação (2021).

1.16 MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos é uma ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, sendo estes em repouso ou movimento.

- Tem sido tradicionalmente aplicada em áreas da engenharia, tais quais:
- Ação de fluidos sobre superfícies submersas. (Ex: Diques e barragens);
- Equilíbrio de corpos flutuantes. (Ex: Embarcações);
- Refrigeração Industrial (Escoamento de fluidos em tubulações)
- Ação do vento sobre construções civis;
- Estudos de lubrificação;
- Transporte de sólidos por via pneumática ou hidráulica. (Ex: Elevadores hidráulicos);
- Cálculo de instalações hidráulicas. (Ex: Instalação de recalque);
- Cálculo de máquinas hidráulicas. (Ex: Bombas, turbinas e compressores);
- Instalações de vapor. (Ex: Caldeira);
- Ação de fluidos sobre veículo. (Ex: Aerodinâmica)

1.17 DEFINIÇÃO DE FLUIDO

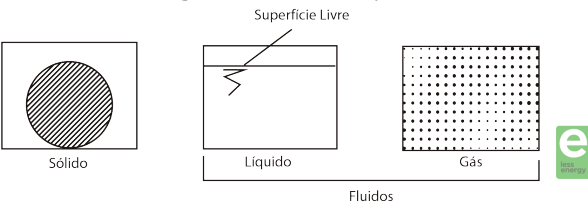
Quando trabalhamos com um fluido temos um sentimento comum que é o oposto do trabalho com um sólido. Os fluidos tendem a escoar quando inte-

ragimos com eles (por exemplo, quando você agita seu café da manhã); os sólidos tendem a se deformar ou dobrar (por exemplo, quando você bate sobre um teclado e as molas sob as teclas se comprimem).

Por definição um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando o quão pequeno seja seu valor. Como o movimento do fluido continua sobre a aplicação dessa tensão, definimos um fluido também como substância que não pode sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso (FOX, 2010).

“Fluido é uma substância que não tem forma própria, assume o formato do recipiente”.

Figura 1.13 - Sólido e fluido



Fonte: Adaptado de Brunetti (2007).

Os fluidos são, portanto, os líquidos e gases, sendo que estes ainda se distinguem dos primeiros por ocuparem todo o recipiente, enquanto os líquidos apresentam uma superfície livre (BRUNETTI, 2007).

Para um sólido, as tensões são desenvolvidas quando um material é deformado ou cisalhado elasticamente, para um fluido, as tensões de cisalhamento aparecem devido ao escoamento viscoso. Deste modo, dizemos que os sólidos são elásticos e os fluidos são viscosos. (FOX, 2010).

1.17.1 TENSÃO DE CISALHAMENTO

É o quociente entre o módulo de componente tangencial da força F e a área sobre qual a força é aplicada. Em outras palavras, tensão de cisalhamento 'τ' é a força tangencial por unidade de área.

τ = Ftg / A (1.26)

Onde 'τ' é a tensão de cisalhamento (N/m²), Ftg a força tangencial (N) e A área (m²).

Considerando o fenômeno de escoamento temos que a partir da aplicação de uma tensão de cisalhamento um elemento sólido deforma e estabelece o equilíbrio estático e um elemento fluido deforma e não estabelece o equilíbrio.

1.18 VISCOSIDADE

A viscosidade é a resistência ao escoamento de um fluido. Como vimos anteriormente os líquidos e gases são considerados fluidos e cada substância possui uma viscosidade, que se altera de acordo com a temperatura, de modo diferente nos líquidos e gases.