

Carlos H. M. Filartiga

UTILIDADES INDUSTRIAIS
O Uso Eficiente do Vapor na Indústria

Frôntis  Editorial

São Paulo /SP
2024

Copyright© 2024 Carlos H. M. Filartiga

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

1ª edição julho de 2024

Capa e Produção Editorial: *Ricardo Sterchele*

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

Filartiga, Carlos H. M.
Utilidades industriais : o uso eficiente do vapor
na indústria / Carlos H. M. Filartiga. -- 1. ed. --
São Paulo : Frôntis Editorial, 2024.

Bibliografia.
ISBN 978-65-87013-48-0

1. Administração de produção 2. Engenharia
industrial 3. Indústrias - Brasil 4. Máquinas a
vapor I. Título.

24-216540

CDD-670.42

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia industrial 670.42

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



Frôntis Editorial

www.frontis.com.br
escritorio@frontis.com.br
(11)9.4511.6620

Dedicatória

A Todos que de alguma forma contribuem para difundir conhecimento.

Jamais faça do aumento do seu conhecimento, somente um acúmulo de informação. Mas, sim, um aumento de sua competência para poder ajudar no crescimento pessoal, profissional e espiritual de outras pessoas.

O uso eficiente do vapor na indústria

As literaturas disponíveis sobre este assunto são quase sempre muito acadêmicas e voltadas para formação de docentes e não de forma a atender as necessidades de conhecimentos práticos exigidos no dia a dia dos profissionais da indústria.

O objetivo desta obra é preencher esta lacuna nas publicações técnicas, de forma mais prática e aplicável no dia a dia do profissional que trabalha com a termodinâmica e a transferência de calor, apresentando de forma simples e de fácil entendimento os cuidados e as ações recomendadas pelas “Boas Práticas da Engenharia” para o “Uso Eficiente do Vapor na Indústria”.

Está estruturado de forma a seguir o ciclo de um “Sistema de Vapor”, que é composto por: uma área de produção de vapor (Casa das Caldeiras), um circuito de distribuição (tubulações e acessórios de linhas), uma área de utilização (equipamentos e reatores consumidores de vapor), um sistema de captação e um circuito de recuperação de energia do condensado.

Esta obra é fruto de mais de 30 anos de experiência prática na utilização do uso eficiente do vapor nas indústrias. Esperamos que esta contribuição possa vir ajudar e ser um manual prático aos profissionais de utilidades que estejam envolvidos com os processos que utilizam o vapor d’água como fluido de aquecimento nas mais diversas operações unitárias das indústrias.

Carlos Henrique Molina Filartiga

Formado em Engenharia Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós Graduação em Gestão Empresarial e Inovação Tecnológica (ESPM), e Pós Graduação em Eficiência Energética em Refrigeração Industrial pela FAINSEP.

Sua experiência profissional é de mais de 30 anos nas áreas de Utilidades Industriais. Palestrante em Simpósios e Conferências Nacionais e Internacionais (TELEBRAS; ABTCP; IEST), colaborador de Revistas Técnicas (Meio Filtrante) e Associações (ABESCO), FIESP, como autor de textos e trabalhos técnicos.

Atualmente exercendo a função de Consultor Técnico e ministrando cursos de qualificação profissional em Associações e Empresas (FIERN, FIEP, PETROBÁS, AMBEV).

LinkedIn: Carlos Filartiga

Epigrafe

Um livro agradável de leitura que aborda conceitos básicos de Termodinâmica, Estudos de Transferência de Calor e Massa e Fenômenos de Transporte. Acredito que a combinação destas três áreas de conhecimento torna mais fácil a compreensão dos sistemas de vapor e condensado. O texto também inclui uma conexão histórica, apresentando a evolução das práticas relacionadas a estes conceitos e destacando os principais atores envolvidos no desenvolvimento da área termal desde a Revolução Industrial.

Este livro é baseado em capítulos que abrangem assuntos relacionados à Geração, Distribuição, Utilização de Vapor e Recuperação de Condensado, fornecendo uma compreensão das Melhores Práticas de Engenharia para cada aplicação, possíveis consequências se estas práticas não são consideradas, e como dimensionar corretamente com cálculos de dimensionamento, escolha de equipamentos apropriados e análise dos ganhos energéticos resultantes de um sistema bem dimensionado.

Considerando as grandes tendências de sustentabilidade, que visam reduzir os efeitos dos gases de efeito estufa na atmosfera (Greenhouse gas), é importante destacar que a energia térmica utilizada em processos industriais, como no setor de Alimentos e Bebidas, pode ser responsável por mais de 50% do consumo de energia. O uso eficiente de vapor e condensado é, portanto, um tema atual e amplamente debatido. Leituras como esta são importantes para aprimorar e aumentar a eficiência destes processos.

Este livro apresenta uma leitura simples, com exemplos práticos e reais, e métodos amplamente utilizados para cálculo, tornando-se uma ferramenta útil para aqueles que trabalham na área térmica, abrangendo aplicações nas indústrias Química e Petroquímica, Produção de Alimentos e Bebidas, Derivados de Borracha, Indústria Farmacêutica e Hospitais entre outros.

Fortunato Sasaki

Formado em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade Metodista de Piracicaba, possui mais de 30 anos de dedicação profissional na área térmica, trabalhando em 4 países (Brasil, México, Peru e Estados Unidos), buscando sempre implementar soluções para aumentar a eficiência térmica em processos industriais.

Apresentação

A ideia de se elaborar esta obra nasceu devido a necessidade de aumentar o meu conhecimento sobre vapor d'água ao longo de minha vida profissional. Em 1980 me formei em Engenharia Química e iniciei minha vida profissional como Engenheiro Químico responsável pelo controle de qualidade de produto na INDOSA – Indústrias de Óleos Vegetais, em Santo Anastácio, SP. Desde essa época, passei a tomar contato com a área de utilidades industriais, principalmente com o vapor d'água, que na indústria de alimentos e bebidas é responsável por quase 50% do consumo total da energia utilizada na manufatura do produto final. A medida em que se passavam os anos nessa atividade, muitos esclarecimentos passaram a ser necessários devido a muitas dúvidas sobre o comportamento do vapor na prática do dia a dia, que necessitavam conhecimentos na área de termodinâmica e de transferência de calor.

Na busca de me aprofundar no conhecimento e esclarecer as minhas dúvidas, me deparei com a total inexistência de trabalhos, dissertações e livros específicos sobre este tão importante fluido de utilidade industrial. As literaturas encontradas, dissertam sobre o assunto de modo geral, sempre antecedendo à explicação do comportamento termodinâmico ou transferência de calor, com a expressão, “considerando que”. Isso impossibilita qualquer dedução prévia sobre qualquer fenômeno que esteja fora da condição considerada, ou seja, as condições operacionais do sistema térmico têm que ser constantes e estabilizadas, condição esta que na prática do dia a dia é impossível de se garantir, já que os fenômenos termodinâmicos e de transferência de calor se alteram ao longo de todo o tempo de processo.

Sendo assim, estas páginas tentam abordar os temas que envolvem os aspectos práticos dos processos de transferência de calor e de termodinâmica de forma clara, e de como se apresentam no dia a dia de trabalho do profissional que está envolvido com o sistema de vapor, nos mais diversos tipos de sua aplicação como fluido de utilidade industrial. Desta forma, procuramos apresentar da forma mais simples e objetiva, os conceitos, aplicações e cálculos envolvidos na termodinâmica e transferência de calor, para que o profissional envolvido possa identificar os fenômenos da forma como eles acontecem realmente na prática do dia a dia. Isto é muito importante devido ao vapor d'água ser o fluido de aquecimento mais utilizado na indústria, principalmente por ele ser um fluido totalmente ecológico, recuperável, além de ser uma energia limpa. Sendo assim, a busca constante de seu uso eficiente torna-se uma necessidade constante, pois quanto maior for a Eficiência de seu uso, menor será o consumo de combustível e conseqüentemente menor será a emissão de gases que contribuem para o “efeito estufa”. O uso do vapor como energia limpa será completa, quando for desenvolvido uma tecnologia, economicamente viável, para substituir a queima do combustível que fornece energia para a sua produção, pela energia solar.

Este trabalho, busca apresentar de forma simples e de fácil entendimento, todos os seguimentos que compõe um sistema de vapor, sua produção, distribuição, utilização, captação do condensado formado, a recuperação de sua energia e posterior retorno ao ciclo de produção do vapor.

Sumário

DEDICATÓRIA	3
O USO EFICIENTE DO VAPOR NA INDÚSTRIA	5
AGRADECIMENTO	7
EPIGRAFE	9
APRESENTAÇÃO	11
CAPÍTULO 1 - CONCEITOS BÁSICOS DA FÍSICA APLICADA AO VAPOR	17
1.1. Um breve histórico da Física como Ciência	17
1.2. Unidades de medidas	21
1.3. Um breve histórico do vapor.	22
CAPÍTULO 2 - O QUE É VAPOR	26
2.1. Os estados e características da matéria.	26
2.2. Diferença entre gás e vapor	27
2.3. A energia da água.	35
2.4. Diferença entre vaporização, evaporação e ebulição.	36
2.5. Por quê se utiliza vapor?	39
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS E TIPOS DE VAPOR	40
3.1. Como se gera o vapor	40
3.2 - Características do vapor saturado	46
3.2.1. Pressão.	46
3.2.2. Calor & temperatura.	53
3.2.3. Volume específico	60
3.3. Tipos de vapor	61
3.3.1. Vapor saturado	62
3.3.2. Título do vapor	62
3.3.3. Vapor superaquecido	63
3.3.4. Grau de superaquecimento	63
3.4. Utilização do vapor.	63
3.4.1. Transferência de Calor	64
CAPÍTULO 4 - PRODUÇÃO DE VAPOR	78
4.1. Breve histórico sobre a produção industrial do vapor	78
4.2. Tipos de equipamentos que produzem vapor	83
4.2.1 - Diferença entre geradores de vapor e caldeiras de vapor	84
4.2.2. Características construtivas das caldeiras	90
4.3. Cuidados com a produção de vapor	93
4.3.1. Nível de água na caldeira	95
4.3.2. O controle do nível	97
4.3.3. Cuidados com a água da caldeira	104
4.3.4. Controle da qualidade da água da caldeira	122
4.3.5. A energia para a produção de vapor - combustão	131
4.3.6. Eficiência da caldeira	140

4.4. Eficiência energética na casa da caldeira	149
4.4.1. Redução das perdas nos gases da chaminé	151
4.4.2. Perdas associadas ao nível de excesso de Ar	153
4.4.3. Perdas por radiação e convecção	156
4.4.4. Recuperação de calor das descargas das caldeiras	156
4.4.5. Redução de perdas por umidade no combustível.	157
CAPÍTULO 5 - DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR	159
5.1. Objetivos do sistema de distribuição do vapor.	159
5.1.1. Causas do arraste de água da caldeira com o vapor.	159
5.2. Tubulações industriais	160
5.2.1. Tubulações para vapor	160
5.2.2. Diferença entre especificação e dimensionamento	163
5.3. Como reduzir o arraste em caldeiras	165
5.3.1. Separadores de umidade.	165
5.4. Classificação de tubulações em sistema de vapor	170
5.4.1. Tubulações principais ou primárias	170
5.4.2. Tubulações secundárias	171
5.4.3. Tubulações de consumo.	173
5.4.4. Cálculo de tubulações para vapor superaquecido.	174
5.4.5. Instalação de tubulações.	175
5.4.6. Suportes de tubulações	182
5.4.7. Cuidados com o sistema de distribuição de vapor	186
5.4.8. Dimensionamento e instalação de bota coletora de condensado.	188
5.4.9. Cálculo da quantidade de condensado formado	188
5.4.10. Isolamento térmico	192
5.5. Acessórios de linha ou de tubulações	213
5.5.1. Filtros	213
5.5.2. Medidores de vazão	221
5.5.3. Válvulas	231
5.5.4. Válvulas de alívio e segurança.	296
5.6. Eficiência energética na distribuição de vapor	342
5.6.1. Perdas de energia devido a vazamento de vapor	342
5.6.2. Perda de energia devido ao isolamento térmico	344
5.6.3. Perdas de energia devido ao desperdício de condensado.	345
5.6.4. Recuperação do vapor flash.	347
CAPÍTULO 6 - UTILIZAÇÃO DE VAPOR	350
6.1. Classificação do vapor d'água	350
6.2. Utilização do vapor saturado	351
6.2.1. Qualidade do vapor saturado	351
6.2.2. O uso eficiente do vapor saturado	369
6.2.2.1. Como se utiliza o vapor	369
6.3. Utilização de vapor superaquecido.	440
6.3.1. Definição de vapor superaquecido	440
6.3.2. Definição de taxa ou grau de superaquecimento	440
6.3.3. Produção do vapor superaquecido	440
6.3.4. Aplicações do vapor superaquecido.	440
6.3.5. Transformação de calor em trabalho.	441
6.3.6. Transformações termodinâmicas	442

6.3.7. Turbinas a vapor (transformação isoentrópica).	447
6.3.8. Redução de pressão em válvulas (transformação isoentálpica)	458
6.3.9. O vapor superaquecido em processo de aquecimento	461
6.3.10. Dessuperaquecedores	464
6.4. Eficiência energética na utilização de vapor	477
6.4.1. Oportunidades para aumentar a eficiência no uso final do vapor	477
CAPÍTULO 7 - FORMAÇÃO E DRENAGEM DE CONDENSADO	478
7.1. Formação de condensado	478
7.1.1. Cálculo da quantidade de condensado formado.	478
7.1.2. Porque eliminar o condensado dos sistemas de vapor	479
7.1.3. Como retirar o condensado do sistema de vapor.	480
7.2. Definição de purgador e qual a condição básica para seu funcionamento	480
7.2.1. Classificação e tipos de purgadores	481
7.2.2. Normas internacionais concernentes a purgadores.	481
7.2.3. Purgadores mecânicos.	481
7.2.4. Purgadores termostáticos	485
7.2.5. Purgador termodinâmico	488
7.2.6. Purgador tipo labirinto.	493
7.2.7. Especificação de um purgador, vantagens e desvantagens	493
7.2.8. Dimensionamento de purgadores.	499
7.2.9. O fenômeno da estolagem (“Stall Point”)	503
7.2.10. Eficiência em drenagem de condensado.	512
7.2.11. Instalação de purgadores.	513
CAPÍTULO 8 - RECUPERAÇÃO DE CONDENSADO E DE SUA ENERGIA	522
8.1. Porque retornar o condensado	522
8.2. O que é o vapor flash.	524
8.2.1. Cálculo da quantidade de vapor flash formado.	524
8.2.2. Cuidados com a formação do vapor flash	525
8.2.3. Aplicações de vapor flash	526
8.2.4. Dimensionamento de linhas de condensado	531
8.2.4.1. Dimensionamento de linha até o purgador.	531
8.2.4.2. Dimensionamento de linha de descarga de purgador.	533
8.2.4.3. Linhas de deslocamento de condensado comum	536
8.2.5. Terminologia de deslocamento de líquidos	537
8.2.6. Aplicação da bomba no deslocamento do condensado.	540
8.2.6.1. Cálculo da altura manométrica por fricção	542
8.2.7. Bombas mecânicas de condensado (deslocamento positivo).	543
8.2.9. Dimensionamento da tubulação de descarga da bomba mecânica de condensado	546
8.3. Exemplos de aplicações de bombas de condensado.	547
8.3.1. Recomendações sobre instalação	549
8.4. Cuidados com o condensado contaminado	551
8.5. Método de cálculo da quantidade de condensado retornado	552
8.6. Eficiência energético com a recuperação do condensado	554
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	556

Capítulo 1

Conceitos básicos da Física aplicada ao vapor

1.1. Um breve histórico da Física como Ciência

Acredita-se que a física como ciência teve o seu início a partir do interesse do homem em entender e explicar os fenômenos que acontecem na natureza, como por exemplo, a movimentação dos corpos, a transferência de calor entre dois corpos, a luz etc. Os historiadores não conseguem afirmar com precisão quando a Física foi entendida como Ciência. A teoria mais aceita é a que sugere que foi quando o homem começou a buscar o esclarecimento dos fenômenos naturais através de experimentos práticos que pudessem ser comprovados.

Desde a Grécia Antiga, os fundamentos da Física já estavam presentes, quando pensadores e filósofos sugeriram as primeiras teorias atômicas, Arquimedes com o princípio da alavanca e Aristóteles com as teorias do movimento, quedas dos corpos graves e o geocentrismo, que eram conhecimentos envolvidos pela física. No entanto, a Física como ciência, somente foi reconhecida no final da Idade Média, com a aplicação do “Método Científico”, que diferenciou a Física da Filosofia e da Religião.

O método científico é um conjunto de procedimentos que devem ser seguidos para a comprovação da teoria e consolidação do conhecimento. Esses procedimentos consistem na observação e simulação sistemática e controlada dos fenômenos da natureza, por meio de pesquisas de campo e experimentos que, posteriormente analisados com base na lógica, devem confirmar ou negar o conjunto de hipóteses que sustentam determinada teoria científica.

O método científico teve sua origem nas civilizações antigas, como no Antigo Egito e na Grécia Antiga, mas foi na sociedade árabe, há cerca de mil anos, com o trabalho do físico e matemático persa Ibn Al-Haytham, nos seus estudos sobre ótica, que as bases do que seria o método científico atual foram iniciadas. O método utilizado por ele já tinha semelhança com o método de Descartes e o atual como: a observação, a pesquisa teórica, a execução do experimento, a análise do experimento, e a comparação da hipótese com os resultados.

O Método Científico foi consolidado com a obra de René Descartes, em “O Discurso sobre o Método”, escrito em 1637 e que afirma que “se há dúvida, ela deve ser esclarecida” e sugere um conjunto de ações guiadas exclusivamente pelo raciocínio lógico e dedutivo, e pela razão, rejeitando qualquer tipo de afirmação sem comprovação, baseado em sentimento ou percepção como fonte primária de conhecimento.

Galileu Galilei foi um dos maiores físicos, astrônomos e matemáticos da história da ciência. Ele teve participação importante no período do Renascimento com seus estudos sobre o movimento dos corpos, queda livre e astronomia, que serviram como base para a consolidação da Física Clássica. Porém, coube a Isaac Newton consolidar a Física como ciência, com a sua obra “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, na qual apresenta uma explicação matemática para o fenômeno do movimento dos corpos, através da Lei da Inércia, Princípio Fundamental da Dinâmica e Lei da Ação e Reação.

No século XVIII e XIX, seguiram-se os fundamentos da Termodinâmica e do Eletromagnetismo. James Maxwell fez outra grande contribuição para a evolução da física como ciência, unificando a

eletricidade ao magnetismo sobre os mesmos conceitos matemáticos, sendo a ótica, derivada das teorias eletromagnéticas de Maxwell.

Até o final do século XIX, a comunidade científica acreditava que todos os fenômenos físicos da natureza poderiam ser explicados com base nas teorias já existentes e conhecidas. No entanto, no início do século XX, Max Planck, tentando explicar matematicamente a radiação do corpo negro, introduziu o conceito do “Quantum de Energia” para poder explicar alguns fenômenos que fugiam aos conceitos existentes da física clássica.

Em 1905, Albert Einstein abriu as portas para a nova Física Moderna, com a publicação da “Teoria da Relatividade” ($E = m.c^2$), seguindo-se o “Princípio da Incerteza” de Werner Heisenberg e do “Princípio da Complementaridade” de Niels Bohr. Essas novas teorias deram origem a Física Moderna ou Física Quântica, as quais se dedicam atualmente a explicar a natureza das quatro forças fundamentais: força gravitacional, força eletromagnética, força nuclear forte e força nuclear fraca.

A força gravitacional é a mais fraca de todas elas, porém, é a mais abrangente. Atualmente, a teoria em que está embasada é a “Teoria da Relatividade Geral” de Albert Einstein, a qual postula que a energia contida em uma partícula é igual ao produto de sua massa pelo quadrado da velocidade da luz ($E = m.c^2$). Esta teoria nos mostra que uma pequena quantidade de massa (matéria), pode gerar uma grande quantidade de energia, já que a velocidade da luz está estimada próximo de 300.000 km/s. A teoria também afirma que grandes quantidades de massa são capazes de distorcer a geometria do espaço-tempo.

A força gravitacional é uma força atrativa que atua sobre todas as partículas que possuem massa (férmion) e é responsável por dar forma e estabilidade dinâmica ao sistema planetário e a todo Universo. Desta forma, a “Teoria da Relatividade Geral” de Einstein pode ser classificada como uma “Teoria Geometrodinâmica”, uma vez que ela geometriza a gravitação.

A força gravitacional foi explicada por Isaac Newton, que se fundamentou no Modelo Heliocêntrico de Nicolau Copérnico, em que os planetas giram em torno do sol, e mostrou que a movimentação dos planetas era devido a uma força de atração entre os corpos (planetas). Essa força tem sua representação matemática conforme a equação 1.

Equação 1 – Força de atração entre os corpos,

$$F = G * \left(\frac{M * m}{d^2} \right)$$

Onde:

F = Força gravitacional (kg.m/s²)

G = Constante de Gravitação Universal = 6,67384.10⁻¹¹(m³/kg.s²)

M; m = Massa dos corpos considerados (kg)

D = Distância entre os centros de gravidade dos corpos (m)

Um dos grandes desafios da física moderna é explicar a força gravitacional com base nas teorias da Física Quântica, que atualmente afirmam que ela está relacionada a um “bóson” de spin inteiro chamado gráviton, partículas cuja função é garantir a interação dos corpos com massa, mas que ainda não foram observadas. Atualmente, os estudiosos trabalham para formular uma teoria quântica para a gravitação, algo que ainda não temos.

A força eletromagnética está associada à força de atração ou de repulsão, existente entre a interação de partículas com carga como prótons e elétrons, que constituem os átomos e moléculas e são responsáveis pela formação de toda a matéria conhecida. A essa força se inclui a força eletrostática e a força magnética, e é medida pela intensidade da carga elétrica existente nos bósons chamados “fótons”, que também são responsáveis pela formação dos campos eletromagnéticos.

A força eletromagnética é cerca de 1.036 vezes maior que a força gravitacional e é ela que mantém os elétrons (de carga negativa) em seus orbitais na eletrosfera em volta do núcleo atômico que contém os prótons (de carga positiva). Esta força está presente no átomo somente em distâncias maio-

res que as dimensões do núcleo atômico (10-15 m). A força eletromagnética além de ser encontrada nas partículas com carga elétrica, estão presentes no plasma, na emissão e absorção da luz e outros tipos de radiações eletromagnéticas.

A Eletrodinâmica é a ciência que estuda os fenômenos que acontecem devido às interações entre partículas carregadas eletricamente. O físico francês Charles Augustin Coulomb foi o primeiro a desenvolver uma equação matemática para representar essas interações entre corpos carregados eletricamente.

De acordo com seu postulado (Lei de Coulomb), a força entre partículas eletricamente carregadas é dada pela equação 2.

Equação 2 – Força entre partículas eletricamente carregadas,

$$F = k * \frac{q * q'}{d^2}$$

Onde:

F = Força elétrica entre as duas cargas [N]

K = Constante elétrica de Coulomb 8,99 x 10⁹ [N.m²/C²]

q; q' = Cargas elétricas consideradas [C]

d = Distância entre as cargas [m]

Observe que, uma vez que as cargas elétricas podem possuir sinais diferentes, a força calculada pode ser positiva ou negativa. Se ela for positiva isso significa que os corpos têm cargas elétricas com mesmo sinal e, portanto, se repelem. Se o sinal da força for negativo, isso nos mostra que as cargas elétricas possuem sinais contrários e, portanto, os corpos carregados se atraem. No entanto, coube ao físico escocês James Clerk Maxwell identificar que partículas carregadas quando em movimento produzem uma força de atração ou repulsão que atua perpendicularmente ao sentido do deslocamento de partículas carregadas. A este fenômeno deu-se o nome de Campo Magnético. Essa força, apesar de ser independente da força elétrica que lhe dá origem, é resultado do mesmo fenômeno físico, portanto, são intimamente relacionados.

Maxwell conseguiu demonstrar matematicamente essa interação entre as forças elétricas e magnética através de suas quatro leis que compõem as “Leis do Eletromagnetismo de Maxwell”.

– Lei de Gauss (Lei de Coulomb) – Força elétrica

O postulado foi elaborado pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss em 1835, e publicada em 1867, e mostra a relação existente entre o fluxo do campo elétrico, através de uma superfície fechada, gerado por uma carga pontual localizada no centro dessa superfície fechada.

A expressão matemática da Lei de Gauss é representada pela equação 3.

Equação 3 – Fluxo do campo elétrico,

$$\Phi_E^A = \int_A \vec{E} \cdot dA = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

Onde:

Φ_E^A = Fluxo do campo elétrico

\vec{E} = Campo vetorial elétrico

dA = Variação de área

q_{in} = Carga pontual interna à superfície

ϵ_0 = Constante de permissividade elétrica no vácuo (8,854187817 x 10⁻¹²) C²/N.m²)

– Lei de Ampere-Maxwell – Campo Magnético

Define a formação do campo magnético produzido por uma corrente elétrica constante que passa através de fio condutor de comprimento definido. De acordo com a equação 4.

Equação 4 – Campo magnético,

$$\oint_L \vec{B} \times d\vec{l} = B = \frac{\mu_0 \times I_{in}}{2\pi \times d}$$

Onde:

B = Campo magnético produzido (T)

μ_0 = Constante magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A)

i_{in} = Corrente elétrica (A)

d = Distancia do condutor ao ponto referenciado (m)

– Lei de Faraday – Fluxo do campo magnético

Conhecida também como a Lei da Indução Eletromagnética, afirma que a variação do fluxo do campo magnético que atravessa um condutor produz uma tensão elétrica na qual dá origem a uma corrente elétrica (FEM – Força Eletromotriz), conforme a equação 5.

Equação 5 – Fluxo do campo magnético,

$$\epsilon = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Onde:

ϵ = Força eletromotriz induzida (V)

$\Delta\phi$ = Variação do fluxo magnético (Wb)

Δt = Intervalo de tempo (s)

O sinal negativo da fórmula indica que o sentido da fem induzida é em oposição à variação do fluxo magnético.

– Lei da ausência de campos magnéticos livres

É o nome dado à Lei de Gauss para o Magnetismo, e consiste na representação da lei de Gauss sob forma diferencial, representada conforme equação 6.

Equação 6 – Lei de Gauss para o magnetismo,

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0$$

Onde:

∇ = Divergente

B = Campo magnético

A Força Nuclear Forte é a maior força encontrada na natureza atualmente. É responsável por garantir a estabilidade do núcleo atômico (seu alcance é de um raio de 10-15 m). Núcleos atômicos de raios maiores tendem a ser instáveis e é medida por bósons chamados de “glúons”. Ela é cem vezes maior que a força eletromagnética superando a força eletrostática do núcleo. Desse modo, a força nuclear forte é responsável por manter o equilíbrio entre os prótons e os nêutrons. Estes, são compostos por partículas chamadas “quarks”, que por sua vez, se combinam para formar os “hádrons”. Atualmente, são conhecidos seis tipos de quarks, os quais são classificados por sua quantidade de massa denominados “sabores”, tais como:

- Quarks “Up” – Com massa entre 1,7 e 3,3 MeV
- Quarks “Down” – Com massa entre 4,1 e 5,8 MeV
- Quarks “Top” – Com massa aproximada de 101 MeV
- Quarks “Bottom” – Com massa aproximada de 1.270 MeV
- Quarks “Strange” – Com massa aproximada de 4,9 GeV
- Quarks “Charm” – Com massa aproximada de 172 GeV

As unidades são apresentadas em eletro Volts com base na Teoria da Relatividade Geral ($E = m.c^2$) de Einstein:

- MeV (mega elétron-Volt) = 1 milhão de elétron-volt = 106 eV

- GeV (giga elétron-Volt) = 1 bilhão de elétron-volt = 109 eV

Sendo assim:

- Quarks “Up” – massa $\approx 7,14 \times 10^{-33}$ e carga igual a +2/3 e
- Quarks “Down” – massa $\approx 1,33 \times 10^{-32}$ e carga igual a -1/ e

As quantidades de massa acima são estimativas, já que os quarks não são encontrados separadamente, mas sempre em grupos, por exemplo, os prótons e nêutrons que são os “hádrons” mais estáveis e que compõe o núcleo atômico são compostos por um grupo de três quarks:

- Os prótons são compostos por dois quarks “Up” e um quark “Down”;
- Os nêutrons são compostos por um quark “Up” e dois quarks “Down”.

Como as cargas dos quarks são frações da carga do elétron ($e = 1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb), o próton possui carga final positiva de $+\frac{1}{3}e$ e o nêutron tem carga final zero (sem carga). Os outros quatro quarks conhecidos (“Top”, “Bottom”, “Strange” e “Charm”) são muito instáveis e somente são detectáveis em aceleradores de partículas.

A Força Nuclear Fraca é a força resultante dos processos nucleares do decaimento radioativo. Um decaimento radioativo ocorre devido à instabilidade do núcleo atômico, que se decompõe espontaneamente e aleatoriamente para formar um novo núcleo com estado energético diferente do qual foi originado. Isto ocorre com emissão de radiação na forma de partículas de alta energia. Portanto, esta força está presente em todas as partículas com características radioativas. A força fraca é aproximadamente um milhão de vezes menor do que a força forte e sua atuação é ainda menor, cerca de 10^{-18} m de raio.

1.2. Unidades de medidas

Estima-se que o homem tenha entendido o conceito de medida até mesmo antes do aparecimento da linguagem, já que ele podia distinguir, por exemplo, o tamanho de um peixe como grande ou pequeno, a localização da caça como perto ou longe, e também a quantidade de alimento, muito ou pouco, necessário para se satisfazer ao longo do dia.

A partir do momento que o homem passou a viver em grupo, a necessidade de parâmetros comparativos para se avaliar quantidades tornou-se imperativo. No início, a maneira que se utilizava para medir as grandezas era bastante simples. Partes do próprio corpo eram usadas como referência (comprimento do pé e palmo). Com o aumento desses grupos as relações de troca exigiram uma evolução e definição de padrões de comparação, já que se identificou a diferença dessas medidas entre pessoas diferentes. Desta forma, a demarcação de propriedades, a construção de casas e navios e a evolução do comércio exigiram a definição de padrões de medidas que pudessem ser utilizadas por todos.

Os primeiros vestígios de sistemas de medições conhecidos foram encontrados na região do Vale do Indo, região onde atualmente encontram-se Afeganistão, Paquistão e Índia, e onde desenvolveu-se a civilização chamada de Harappan, no período de 3.000 aC a 1.500 aC. Os sistemas encontrados foram padronizados em unidades de pesos e medidas que poderia ser comparado e calibrado por aparelhos de aferição.

Outros sistemas foram utilizados por outras civilizações, como as que viveram na Mesopotâmia, no Egito e na Babilônia, e pelos Persas, Gregos e Romanos, que tinham padrões diferentes, como por exemplo o comprimento.

Os egípcios, há 4.000 anos, utilizavam o “cúbito”, que era a distância equivalente entre o cotovelo e a ponta do dedo médio de seus faraós. A polegada era a distância da largura do dedo polegar, (na Babilônia utilizava-se a medida de “um dedo” que equivalia a aproximadamente 16 mm, e o cúbito equivalia a 30 dedos).

Os padrões de medidas evoluíram para atender às necessidades do avanço do comércio internacional e para a equalização do entendimento sobre ciência e tecnologia. Atualmente, os padrões de medidas foram unificados no chamado SI (Sistema Internacional de Unidades), que classifica as unidades como Grandezas Básicas e Grandezas Derivadas.

Tabela 1 - Grandezas de base e unidades do SI			
Grandeza de base	Símbolo	Unidade de base	Símbolo
Comprimento	l, h, r, x	Metro	m
Massa	m	Quilograma	kg
Tempo, duração	t	Segundo	s
Corrente elétrica	l, i	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	T	Kelvin	K
Quantidade de substância	n	Mol	mol
Intensidade luminosa	IV	Candela	Cd

Fonte: The Steam and Condensate Loop, Published by Spirax Sarco, First Edition, 2007

No sistema SI existem outras unidades as quais são unidades derivadas das grandezas básicas, representadas na tabela 2.

Tabela 2 - Grandezas derivadas no SI				
Quantidade	Nome	Símbolo	Unidade base SI	Unidade Derivada
Área	metro quadrado	A	m ²	-
Volume	metro cúbico	V	m ³	-
Velocidade	metro por segundo	u	m/s	-
Aceleração	metro por segundo ao quadrado	a	m/s ²	-
Força	newton	N	kg m/s ²	J/m
Energia	joule	J	kg m ² /s ²	N m
Pressão	pascal	Pa	kg/m s ²	N/m ²
Energia	watt	W	kg m ² /s ³	J/s

Fonte: The Steam and Condensate Loop, Published by Spirax Sarco, First Edition, 2007

A tabela 3 apresenta outras grandezas derivadas das grandezas de base do SI e que serão muito úteis para o estudo da engenharia do vapor.

Tabela 3 - Outras grandezas derivadas		
Quantidade	Unidade base SI	Unidade derivada
Densidade de massa	kg/m ³	kg/m ³
Volume específico	m ³ /kg	m ³ /kg
Entalpia específica	m ² /s ²	J/kg
Calor específico	m ² /s ² K	J/kg K
Entropia específica	m ² /s ² K	J/kg K
Vazão de calor	m ² kg/s ³	J/s ou W
Viscosidade dinâmica	kg/m s	N s/m ²

Fonte: The Steam and Condensate Loop, Published by Spirax Sarco, First Edition, 2007

1.3. Um breve histórico do vapor

O conhecimento de que o vapor poderia ser utilizado como força motriz, data do primeiro século da era cristã, portanto, há mais de 1800 anos, que um estudioso chamado Heron de Alexandria construiu uma espécie de turbina a vapor chamada “eolípila” (Figura 1).

Figura 1 – “Eolípila” de Heron de Alexandria



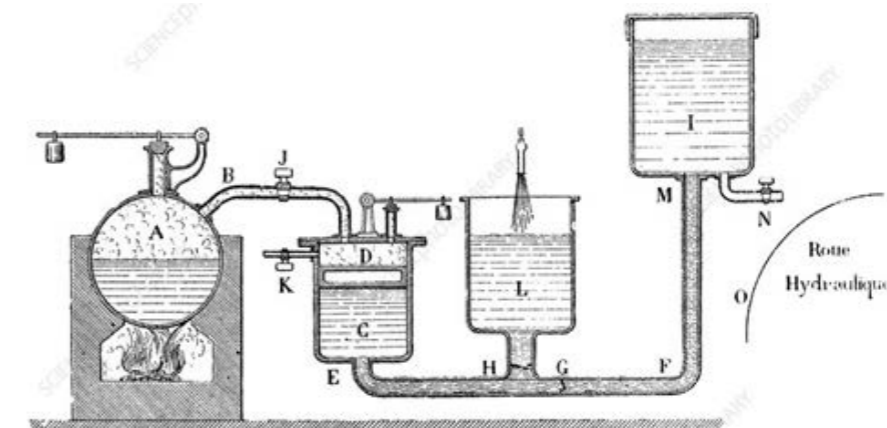
Fonte: Steam – Its Generation and Use, The Babcock & Wilcox Company, Edition 41, 2005

Nesse engenho, enchia-se um recipiente de metal com água, que era aquecida com a queima de madeira até produzir vapor. O vapor expandia e fazia a esfera girar ao sair através de dois bicos posicionados de forma diametralmente opostas. No entanto, embora isso movimentasse a esfera nenhum trabalho útil era produzido e o sábio não conseguiu ver nenhuma utilidade prática para seu invento.

Muitos séculos mais tarde, a máquina a vapor foi a primeira maneira eficiente de produzir energia, independentemente da força muscular do homem e do animal, e da força do vento e das águas correntes. A invenção e o uso desta máquina foram uma das bases tecnológicas da Revolução Industrial. Em sua forma mais simples, as máquinas a vapor utilizam a característica da água, de que quando convertida em vapor, se expande e ocupa um volume de até 1.600 vezes maior que o volume original ocupado pela água em sua forma líquida, quando sob pressão atmosférica.

Foi somente no século XVII, mais precisamente em 1690, que o físico francês Denis Papin usou esse princípio para bombear água (Figura 2).

Figura 2 – Máquina de vapor de Papin, Século XVII



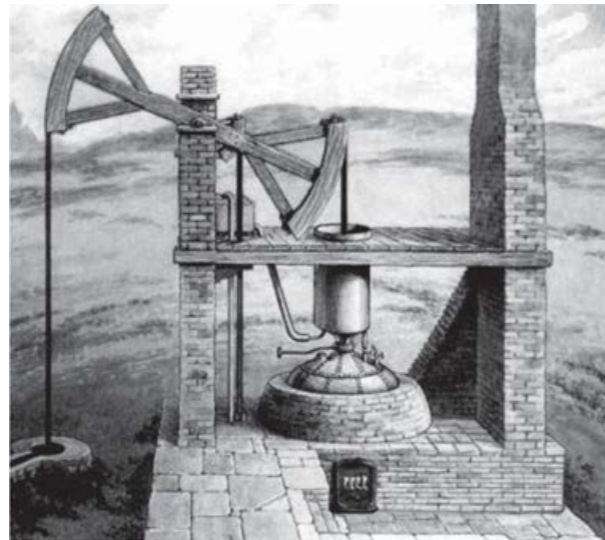
Fonte: Banco de Imagem - CO22/9049 – Biblioteca de Fotos Científicas – Google Chrome

O equipamento bastante rudimentar inventado por ele, era composto de um pistão (D) dentro de um cilindro (C) que continha uma certa quantidade de água, e que ficava conectada, por meio de uma tubulação (B), a uma fonte de calor (A) no qual se colocava uma pequena quantidade de água e que funcionava como uma caldeira. O vapor produzido a pressão acima da pressão atmosférica era

conduzido pelo tubo (B) até a câmara acima do pistão (D) gerando uma pressão no interior do cilindro (C) que forçava o pistão (D) a se movimentar para baixo, reduzindo o volume de água líquida no cilindro (C), a qual era deslocada pela saída (E) do cilindro (C) até ao tanque (I) de armazenagem de água, por meio da tubulação (F) e entrada (M). Então, a fonte de calor era interrompida pela válvula (J) de admissão de vapor, o que fazia o vapor da câmara acima do pistão (D) esfriar e se condensar. Isso criava um vácuo parcial (pressão abaixo da pressão atmosférica) dentro do cilindro. Como a pressão sobre o pistão era a pressão atmosférica exercida sobre a coluna de água do tanque (L) de compensação, ela o empurrava para cima o pistão (D), realizando trabalho. Na figura 2 apresentada, (H) e (G) localizadas abaixo do tanque (L) de compensação, são válvulas de retenção e (K) e (N) são válvulas de bloqueio.

A utilização efetiva dessa tecnologia só se iniciou com a invenção de Thomas Savery patenteada em 1698 e aperfeiçoada em 1712 por Thomas Newcomen e John Calley (Figura 3).

Figura 3 – Máquina de vapor de Newcomen e John Calley

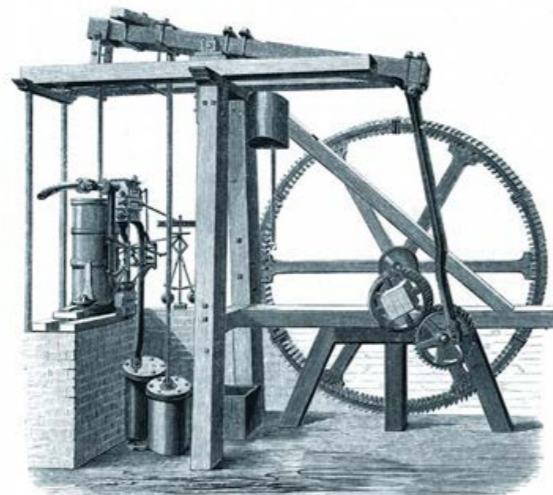


Fonte: *Steam – Its Generation and Use, The Babcock & Wilcox Company, Edition 41, 200* Figura

Nessa máquina, o vapor gerado em uma caldeira era enviado para um cilindro localizado na parte superior da caldeira. Um pistão era puxado para cima por um contrapeso. Depois que o cilindro ficava cheio de vapor, injetava-se água nele, fazendo o vapor condensar. Isso reduzia a pressão dentro do cilindro e fazia o ar externo empurrar o pistão para baixo. Um balancim era ligado a uma haste que levantava o êmbolo quando o pistão se movia para baixo. O vácuo resultante retirava a água de poços de mina que estavam inundados.

Contudo, um construtor escocês de instrumentos chamado James Watt notou que a máquina de Newcomen, que usava a mesma câmara para alternar vapor aquecido e vapor condensado desperdiçava combustível. Por isso, em 1765, ele projetou uma câmara condensadora separada, refrigerada a água. Ela era equipada com uma bomba que mantinha um vácuo parcial e uma válvula que retirava periodicamente o vapor do cilindro (Figura 4).

Figura 4 – Máquina de vapor de James Watt – 1765



Fonte: https://www.bonitworksdaily.com/wp-content/uploads/2012/12/Alamy_BBY8N0.jpg

Isso reduziu o consumo de combustível em 75%. Essa máquina corresponde aproximadamente à máquina a vapor moderna.

Em 1782, ele projetou e patenteou a máquina rotativa de ação dupla na qual o vapor era introduzido de ambos os lados do pistão de modo a produzir um movimento para cima e para baixo. Isso tornou possível prender o êmbolo do pistão a uma manivela ou um conjunto de engrenagens para produzir movimento rotativo e permitiu que essa máquina pudesse ser usada para impulsionar mecanismos, girar rodas de carroças ou pás para movimentar navios em rios.

No fim do século XVIII, as máquinas a vapor produzidas por Watt e seu companheiro Matthew Boulton forneciam energia para fábricas, moinhos e bombas na Europa e na América.

O aparecimento das caldeiras, que podiam operar com altas pressões e que foram desenvolvidas por Richard Trevithick na Inglaterra e por Oliver Evans nos Estados Unidos, no início do século XIX, se tornaram a base para a revolução dos transportes uma vez que elas podiam ser usadas para movimentar locomotivas, barcos fluviais e, depois, navios.

A máquina a vapor tornou-se a principal fonte produtora de trabalho do século XIX e seu desenvolvimento se deu no esforço de melhorar seu rendimento, a confiabilidade e a relação peso/potência. No entanto, o advento da energia elétrica e do motor de combustão interna no século XX, condenaram pouco a pouco, nos países mais industrializados, a máquina a vapor quase ao esquecimento. No século XX, a máquina a vapor como fornecedora de energia foi sendo substituída por:

- Turbinas a vapor, para a geração de energia elétrica;
- Motores de combustão interna para transporte;
- Geradores para fontes portáteis de energia;
- Motores elétricos, para uso industrial e doméstico.

Mesmo assim, o vapor ainda hoje tem extensa aplicação industrial nas mais diversas formas, dependendo do tipo de indústria e da região onde está instalada.