

⑤

CÓDIGO: DQF1042025-26



⇒ EQUAÇÕES DE MAXWELL E ONDAS ELE-TROMAGNÉTICAS

PODEMOS AFIRMAR, BASEANDO-NOS NAS FUNDAMENTAÇÕES DE TEXTOS CIENTÍFICOS E DOCUMENTAÇÕES HISTÓRICAS, QUE O MAGNETISMO ESTATICO FOI/É ESTUDADO DESDE A ANCESTRALIDADE DAS CIVILIZAÇÕES MODERNAS, HOJE CONTEMPORÂNEAS E/OU NEO-CONTEMPORÂNGAS.

NA DÉCADA DE 1750, MAIS PRECISAMENTE, NO ANO DE 1755, CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB, ATRAVÉS DE INCESSANTES OBSERVAÇÕES, ESTABELECEU E ENUNCIOU A FORÇA DE ATRAÇÃO/REPULSÃO QUE MODULA O COMPORTAMENTO DE DUAS CARGAS PUNTIFORMES/ PONTUAIS CARREGADAS, ATRAVÉS DA EXPRESSÃO/ LEI QUE LEVA O SEU NOME:

①
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\vec{r}^3} \hat{r}$$
, VETORIAL OU, EM MÓDULO:

②
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$
, ONDE F É O MÓDULO/VALOR ABSOLUTO DA FORÇA,

Q_1 E Q_2 SÃO CARGAS PUNTIFORMES, ϵ_0 ("EPSILON-ZERO") É DEFINIDA COMO A PERMISSIVIDADE ELÉTRICA DO MEIO DE OCORRÊNCIA DO FENÔMENO, E O INTERESSANTE É QUE A LEI DE COULOMB É MODULADA PELO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂN-



②

CIA QUE SEPARA AS CARGAS E/OU CORPOS PUNTIFORMES CARREGADOS, OU SEJA: $Q_1^+, Q_2^+; Q_1^+, Q_2^-; Q_1^-, Q_2^-; Q_1^-, Q_2^+$.

ADICIONALMENTE, A TÍTULO DE INFORMAÇÃO, MENCIONO QUE NÃO É A ÚNICA LEI FÍSICA/DA NATUREZA QUE DECAI COM O INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA, COMO EXEMPLO CITO/MENCIONO A LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE ISAAC NEWTON (TAMBÉM JOHANNES KEPLER - TYCHO BRAHE)

③
$$F_g = \frac{G M m}{r^2}$$
 EM MÓDULO!

E HÁ OUTRAS LEIS MODULADAS POR QUOCIENTES QUE "DOMINAM" UMA QUEDA MAIS RÁPIDA COM A DISTÂNCIA, COMO O POTENCIAL DE HIDEKI YOKAWA, DE 1935 QUE DOMINA E REGE A ESTABILIDADE NUCLEAR COM A QUEDA EXPONENCIAL. TAMBÉM O POTENCIAL G-12 E MUFINTIN, NA FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA. LEMBRO QUE NA EQUAÇÃO ③ ACIMA:

F_g → MÓDULO DA FORÇA DE ATRAÇÃO ENTRE AS MASSAS
 G → CONSTANTE GRAVITACIONAL $\sim 6,67 \times 10^{-11}$
 M E m → MASSAS, MAIOR E MENOR ENVOLVIDAS NO FENÔMENOS
E " r^2 " → INDICA QUE É UM FENÔMENOS QUE DECAI COM O INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA QUE SEPARA, DESTA VEZ, AS MASSAS, NÃO AS CARGAS COMO NO CASO DA LEI DE COULOMB.

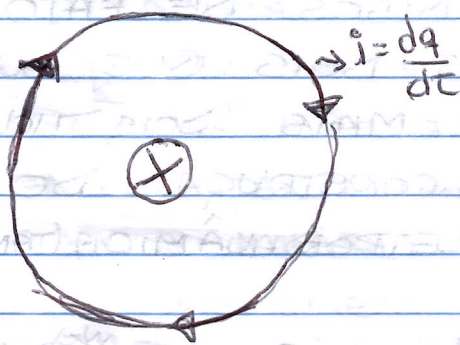
RETORNANDO ÀS EQUAÇÕES DE MAXWELL: PRECISO FAZER UMA PEQUENA CORREÇÃO EM RELAÇÃO À DATA EM QUE COULOMB ENUNCIOU A SUA LEI, ISSO OCORREU APROXIMADAMENTE 20 ANOS APÓS A DATA AFIRMADA NO INÍCIO DO TEXTO, POIS NA DÉCADA DE 1750 É AMPLAMENTE REPORTADO TANTO EM HEBDOMADARIOS, JORNAIS, PERIÓDICOS CIENTÍFICOS E HISTÓRICOS, QUE O AMERICANO BENJAMIN FRANKLIN REALIZAVA SEUS ousados, perigosos e, PORQUE NÃO DIZER DE FORMA LÚDICA, "KAMIKAZES"/"SUICIDAS" EXPERIMENTOS. A PARTIR DOS EXPERIMENTOS DE BENJAMIN FRANKLIN, COMEÇOU-SE A CONCEBER O CONCEITO DE CORRENTE ELÉTRICA. TARDIAMENTE, MENCIONANDO QUE COM OS EXPERIMENTOS DE COULOMB OS FENÔMENOS DA ELETRECIDADE E MAGNETISMO, ESTAVAM COMEÇANDO A SER "DESTRINCHADOS", QUERO DIZER, COMPREENDIDOS DE FATO. AGORA, OS PRÓXIMOS DOIS QUE SURTIRÃO E, "CLOCARÃO" MAIS "DOIS TIJOLOS" PARA CONTRIBUIR NA CONSTRUÇÃO DO ELETROMAGNETISMO / ELETRODINÂMICA (TAMBÉM) SÃO:

- O DINAMARQUÊS HANS CHRYS^WTIAN ØRSTED
- O FRANCÊS ÁNDRE-MARIE DE AMPÈRE

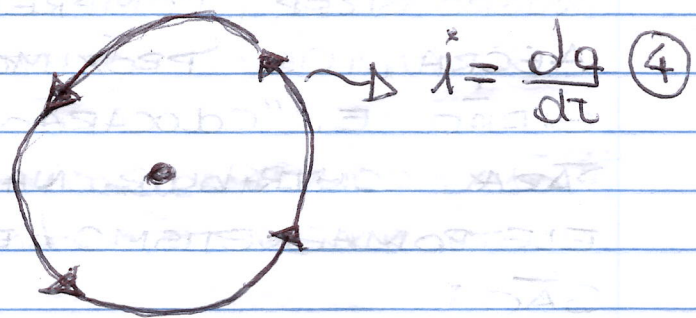
ØRSTED / ØERSTED, EM SEUS EXPERIMENTOS DETECTOU / OBSERVOU (ACIDENTALMENTE),

QUE AO PASSAR UMA CORRENTE ELÉTRICA (ALGO POUCO CONHECIDO NA ÉPOCA) NAS PROXIMIDADE DA PERNA DE UM ANFÍBIO, NO CASO UMA RÃ, OBSERVOU UM MOVIMENTO BRUSCO NA PERNA DO REFERIDO ANIMAL. E ISSO ACONTECIA SEMPRE QUE A CORRENTE ELÉTRICA ERA APLICADA AO FIO. LEMBRO QUE FOI UM EVENTO AINDA OCORRIDO NOS ANOS 1700, OU SEJA, SÉCULO XVIII.

→ ÂNDRE-MARIE DE AMPERE REALIZOU OS EXPERIMENTOS DE PASSAR, OU MELHOR, FAZER UMA CORRENTE ELÉTRICA DE INTENSIDADE CONHECIDA PERCORRER UM ANEL (UMA ESPIRA METÁLICA CONDUTORA) E OBSERVAVA O SURTIMENTO DE UM CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR À TANGENTE DA DIREÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA NA ESPIRA, EM SENTIDO DEPENDENTE DO MOVIMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA ($i = dq/dt$) NA ESPIRA, OU SEJA:



SENTIDO HORÁRIO:
"B" ENTRA NO PLANO
DA FOLHA



SENTIDO ANTI-HORÁRIO:
"B" SAI DO
PLANO DA FOLHA

E, A PARTIR DAS OBSERVAÇÕES DE ØRSTED E AMPERE, SURTIU A LEI DE AMPERE, QUE NA SUA FORMA INTEGRAL, PODE SER ESCRITA COMO:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (5)$$

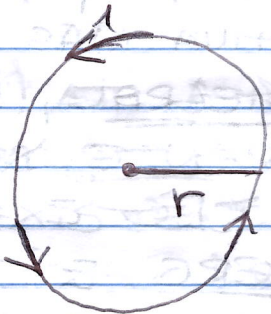
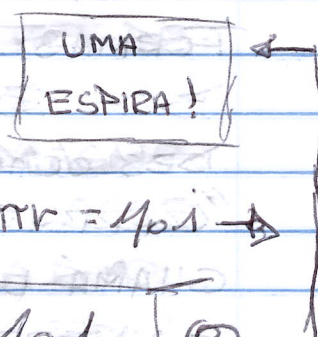
$\mu_0 \sim 4\pi \times 10^{-7} \text{ G/cm}^2$ (6)

ONDE A INTEGRAL É EM UM CICLO FECHADO, "dl" É UM ELEMENTO INFINITESIMAL DA ESPIRA, μ_0 É A PERMEABILIDADE (ALGUNS INSISTEM EM CHAMAR "SUSCEPTIBILIDADE", MAS NÃO É CORRETO POIS SUSCEPTIBILIDADE POSSUI OUTRO SIGNIFICADO FÍSICO) DO MEIO, E i A INTENSIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA.

PARA O CASO DE "N" ESPIRAS, TEREMOS:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 N i \quad \rightarrow (7)$$

PARA O CASO DE UMA ESPIRA, TEMOS


 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \rightarrow$

 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot 2\pi r = \mu_0 i \rightarrow$

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (8)$$

TRAÇA-SE A SUPERFÍCIE AMPERIANA E QUEM-SEO MÓDULO



6

QUERO LEMBRAR AQUI QUE, HÁ A
LEI DE BIOT-SAVAT, QUE TEM
PRATICAMENTE O MESMO EFEITO DA
LEI DE AMPERE. NO ENTANTO,
A LEI DE AMPERE LEVA VANTAGEM
POR APROVEITAR AS IMPORTANTES
SIMETRIAS DA NATUREZA.

MENCIONO TAMBÉM A FORÇA DE
LENZ QUANDO A CORRENTE ELÉTRICA
PERCORRE FIOS CONDUTORES PARALELOS

(9)
$$\vec{F}_{12} = i L \vec{B} \text{ (MÓDULO)}$$

Fio (1) $\xrightarrow{i}$ } SERÁ ATRATIVA SE
Fio (2) $\xrightarrow{i}$ } SENTIDO DE i FOR
DIFERENTE E
REPULSIVA SE O SENTIDO DA CORRENTE
FOR O MESMO.

ANTES DE ENTRAR NO TEMA DO
ÚLTIMO "CONTRIBUIDOR", POR ASSIM DIZER
DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL E, A PRE-
SENTA-LAS DE FORMA OBJETIVA NAS
FORMAS DIFERENCIAL E INTEGRAL,
BEM COMO ADICIONA A CORRENTE DE
DESLOCAMENTO EM CIRCUITOS RLC E
"CORRIGIR" A LEI DE AMPERE E
CHAMÁ-LA, COMO CORRETO DE LEI DE
AMPERE-MAXWELL, É NECESSÁRIO
TECER IMPORTANTES COMENTÁRIOS ANTES

DA "ENTRADA DO MICHAEL FARADAY NA PISTA".



COMENTÁRIOS:

i)

A LEI DE COULOMB DA FORMA:

$$\textcircled{2} \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{MÓDULO}$$

É LIMITADA, CONSIDERA CARGAS SOMENTE PONTUAIS / PUNTIFORMES [NÃO "LIDA" COM CARGAS DISTRIBUIDAS NEM DIELÉTRICOS] FOI GENERALIZADA, NOS ANOS 1700-1800 PELO MATEMÁTICO ALEMÃO CHAMADO CARL FRIEDRICH GAUSS E TEM A FORMA INTEGRAL:

$$\textcircled{30} \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q$$

→ AH SIM DÁ E ORTONORMAL À SUPERFÍCIE E // À DIREÇÃO DE $\vec{E}$!

- q É A CARGA TOTAL OBTIDA PELA SIMERIA
- dA ELEMENTO DE ÁREA DA SUPERFÍCIE GAUSSIANA
- $\vec{E}$ O VETOR CAMPO ELÉTRICO COM MÓDULO, DIREÇÃO E SENTIDO

04/05/2026

ii) ATÉ A DATA DE HOJE, NÃO FOI DEMONSTRADA NEM POR HIPÓTESE A EXISTÊNCIA DE MONÓPOLOS MAGNÉTICOS; LEO, UMA DAS EQUAÇÕES QUE VAMOS UTILIZAR PARA COMPOR O CONJUNTO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL É A LEI

DE GAUSS PARA O MAGNETISMO, QUE AFIRMA NÃO EXISTIR MONOPOLOS MAGNETICOS?

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (11)$$

OU, NA FORMA DIFERENCIAL, TEREMOS:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad \neq \text{MONOPOLOS MAGNETICOS.} \quad (12)$$

LEI DE GAUSS PARA O MAGNETISMO



AGORA RETORNAMOS AO BRITÂNICO, LIVREIRO, AUTODIDATA QUE INVENTOU O PRIMEIRO MOTOR DE CAMPO GIRANTE NO PLANETA, SIR MICHAEL FARADAY.

FARADAY SE FEZ A PERGUNTA:

"ORA, ORA SE CORRENTE ELÉTRICA [$i = dq/dt$], QUE É "CARGA EM MOVIMENTO" PODE INDUZIR UM CAMPO MAGNÉTICO EM UMA DETERMINADA REGIÃO, PORQUE O OPÓSTO TAMBÉM NÃO DEVERIA OCORRER, COM A CERAÇÃO DE UMA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDO, SÔ?!" $\Rightarrow$ E DE FATO, OCORRE!

CÓDIGO: DQF1042025-26



FARADAY TEORIZOU E TESTOU
SUA PROPOSIÇÃO AINDA NO
SÉCULO XVIII (AO FINAL DESTA)
E EIS A LEI DE MICHAEL

FARADAY: A LEI DOS MOTORES
DE CAMPO GIRANTE, LEI DA HIDROE-
LÉTRICAS, TERMOELÉTRICAS, ... DE
MUITOS ELETRODOMESTICOS

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{q} = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (13)$$

$$\vec{\nabla} \times \frac{\vec{E}}{\epsilon_0} = \frac{\partial H}{\partial t} \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{D} = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (14)$$

AS QUATRO EQUACOES DE
JAMES CLERCK MAXWELL
ESTÃO (JÁ) ESCRITAS E
DA COMBINAÇÃO DA LEI DE
FARADAY COM A LEI DE AMPERE
MAXWELL OBTENEMOS A EQUAÇÃO DA
ONDA ELETROMAGNETICA (TEMPO CURTO
AQUI) $\Rightarrow$ ADICIONAR-SE-A:

- MAXWELL AS GENERALIZOU EM
1865, NÃO FOI APROVADO. PRINCIPAL-
MENTE POR BOLTZMAN, LUDWIG,
QUE AINDA ACREDITAVA NO
"ETER" !



BOLTZMAN TRAVOU A VIDA
DO MAXWELL POR MUITO
TEMPO.

E AFIRMO QUE MAXWELL
OBTVEU O ULTIMO AVANÇO
QUE PODEMOS CHAMAR CLASSICO
DA FISICA MODERNA:

DEPOIS, EM 1900, VELO PLANCK,
E QUANTIZOU A RADIAÇÃO
TERMICA E TUDO MUDOU!

FINALIZO:

EINSTEIN FOI QUEM
MAIS ENTENDEU MAXWELL

TEMPO END