

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

DIEGO FERNANDES
ERISON CARLOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA ENERGIA DISSIPADA POR ANTENAS:
ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE EXPLOSÃO DE COMBUSTÍVEL PROVOCADA
POR ANTENAS DE CELULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

DIEGO FERNANDES

ERISON CARLOS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA ENERGIA DISSIPADA POR ANTENAS:
ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE EXPLOSÃO DE COMBUSTÍVEL PROVOCADA
POR ANTENAS DE CELULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Pinho

CURITIBA

2014

**DIEGO FERNANDES
ERISON CARLOS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA ENERGIA DISSIPADA POR ANTENAS:
ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE EXPLOSÃO DE COMBUSTÍVEL PROVOCADA
POR ANTENAS DE CELULAR**

Este projeto foi apresentado dia 12 de agosto de 2014, como requisito para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, à banca examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a banca examinadora considerou o projeto de pesquisa aprovado.

ORIENTAÇÃO

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pedro Zambianchi Junior, PhD.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciana Rocha Hirsch, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A Deus acima de tudo e de todos. Aos nossos pais, pelo carinho e bons ensinamentos. Aos nossos amigos, pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Antônio Carlos Pinho pela orientação deste trabalho, ao professor Altemir José Borges, pelo apoio oferecido para encontrarmos dados e teorias pertinentes ao estudo e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela estrutura a nós cedida. Também reverenciamos mais uma vez nossos pais e todos os colegas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Penso noventa e nove vezes e nada descubro; deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio - e eis que a verdade se me revela.”

Albert Einstein

RESUMO

FERNANDES, Diego; OLIVEIRA, Erison Carlos de; Estudo da energia dissipada por antenas: análise da possibilidade de explosão de combustível provocada por antenas de celular 2014. 95 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Um aparelho celular é capaz de provocar a explosão de um combustível? Neste trabalho foi abordada a influência que uma onda eletromagnética emitida por uma antena monopolo de um quarto de comprimento de onda sobre um volume definido de combustível, particularmente gasolina. Uma antena dissipa em *Near Field* e *Far Field*. O interesse deste trabalho está no Near Field, o qual se imaginou ser o responsável pela explosão do aparelho por ondas eletromagnéticas. Não há um consenso científico de que a utilização de um telefone celular possa ser considerada um fator de risco em locais com grande potencial explosivo. Para isso, foram estudadas as dissipações de ondas eletromagnéticas de um aparelho celular no instante de pico, em que a intensidade do campo é maior, utilizando dados nominais de aparelhos comercializados no Brasil. Além disso, foi escolhida uma antena com equações pré-definidas, as quais foram adaptadas para aproximar-se dos valores reais de dissipação dos aparelhos, existente em alguns manuais de usuário. Para chegar a uma conclusão sobre a possibilidade de explosão, foi preciso estudar o comportamento termodinâmico de combustíveis, particularmente da gasolina em estado de vapor. Como variáveis dependentes teve-se a temperatura ambiente, concentração de ar/combustível, volume escolhido para estudo, massa específica dos elementos componentes da mistura, condutividade elétrica e outros dados menos relevantes, porém não menos importantes. Foi preciso criar, em um ambiente computacional, um programa que calculasse a energia dissipada pela antena, e compará-la com os dados de manuais. Assim, o objetivo foi encontrar inicialmente a corrente que circula pela antena do aparelho. Posteriormente, simular qual é a energia de ativação necessária para causar a explosão do combustível, para finalmente e verificar, se com a corrente encontrada, a energia emitida é suficiente, ou não, para iniciar a explosão do combustível.

Palavras Chaves: Electromagnetismo; Celular Causa Explosão

ABSTRACT

FERNANDES, Diego; OLIVEIRA, Erison Carlos de; Study of energy dissipated by antenna: analysis of the possibility of explosion caused by fuel cell phone antenna. 2014. 95 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

A mobile device is capable of causing the explosion of a fuel? In this work we addressed the influence of an electromagnetic wave emitted by a monopole antenna of a quarter wavelength over a defined volume of fuel, particularly gasoline. An antenna dissipates in Near Field and Far Field. The interest of this work is in the Near Field, which is thought to be responsible for the explosion of the device by electromagnetic waves. There is not a scientific consensus that the use of a mobile phone can be considered a risk factor in areas with high explosive potential. For this, the dissipation of electromagnetic waves from a mobile device at time of peak, where the field strength is increased, using nominal data devices marketed in Brazil were studied. Also, was chosen an antenna with pre-defined equations, which were adapted to approach the real values of the dissipation devices, found on some user manuals. To reach a conclusion about the possibility of explosion, it was necessary to study the thermodynamic behavior of fuels, particularly gasoline in the vapor state. As dependent variables had to room temperature, concentration of air / fuel chosen for study volume, density of the mixture of the elements, electrical conductivity and other less relevant information, but no less important. Had to be created in a computer environment, a program that calculates the energy dissipated by the antenna, and compare it with data from manuals. Thus, the goal was initially to find the current flowing through the device antenna. Later, simulate what is the activation energy required to cause the explosion of fuel, and finally to verify, with the current found, the energy emitted is sufficient or not to initiate the explosion of fuel.

Keywords: Electromagnetism; Cell Phone Causes Explosion

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Corrente da antena e suas componentes	21
Figura 2: Antena Dipolo.....	27
Figura 3: Antena do tipo monopolo sinuoso	28
Figura 4: Aparelho Celular	29
Figura 5: Sistema de Coordenadas Esféricas	59
Figura 6: Elementos Diferenciais em Coordenadas Esféricas.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Energia de Ativação da Gasolina	43
Tabela 2: Valores de energia de ativação em função da condutividade elétrica	49
Tabela 3: Resultados de energia necessária para o início da combustão	51
Tabela 4: Resultados da energia de ativação do combustível	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Energia de Ativação em função do Raio	43
Gráfico 2: Potência dissipada em Função da Condutividade Elétrica	52

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 O ESTUDO.....	13
1.2 TEMA	13
1.2.1 Delimitação do Tema	13
1.3 PROBLEMA E PREMISSAS	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo Geral	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 JUSTIFICATIVA	16
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.7 ESTRUTURAS DO TRABALHO	18
1.7.1 Fundamentação Teórica e Síntese	18
1.7.2 Simulação.....	19
1.7.3 Análise dos dados e conclusão do estudo	19
CAPÍTULO 2 - ANTENAS	20
2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ANTENAS	20
2.2 ANTENAS DIPOLO	26
2.3 ANTENAS MONOPOLO	27
2.4 ANTENAS MONOPOLO SINUOSO	28
2.5 DADOS DE MANUAIS DE APARELHOS CELULARES	29
2.5.1 Ambientes potencialmente explosivos	30
CAPÍTULO 3 - ESTUDO DA GASOLINA	32
3.1 TERMODINÂMICA.....	32
3.2 TRABALHO E ENERGIA.....	32
3.3 CALOR.....	33
3.4 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	35

3.5 ENTALPIA	35
3.6 COMBUSTÃO	37
3.6.1 Combustão Completa e Incompleta	37
3.6.2 Pontos de fulgor, combustão e ignição.....	38
3.6.3 LSE e LIE	38
3.6.4 Calor Específico e Calor Latente.....	39
3.6.5 Densidade específica	40
3.7 ENERGIA DE ATIVAÇÃO	41
3.8 SUPERFÍCIES DE ESTUDOS	42
3.9 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	44
CAPÍTULO 4 – SIMULAÇÃO	45
4.1 DIFICULDADES DE PROGRAMAÇÃO.....	45
4.2 O PROGRAMA.....	46
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS	48
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO	53
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO 8 - ANEXOS.....	57
ANEXOS A - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	57
A.1 ANÁLISE VETORIAL	57
A.1.1 Produto Escalar	57
A.1.2 Produto Vetorial	57
A.1.3 Sistema de Coordenadas Esféricas.....	58
A.1.4 Operador Del	61
A.1.5 Gradiente de um Campo Escalar.....	61
A.1.6 Rotacional	61
A.1.7 Divergente.....	62
A.1.8 Teorema de Stokes.....	62

A.1.9 Teorema da divergência	63
A.2 AS EQUAÇÕES DE MAXWELL	63
A.2.1 As grandezas físicas fundamentais do eletromagnetismo	63
A.2.2 Lei de Gauss.....	66
A.2.3 Lei de Gauss para o Magnetismo	66
A.2.4 Lei de Faraday-Neumann-Lenz	67
A.2.5 Lei de Ampère-Maxwell.....	69
A.3 O Teorema de Poynting	70
A.4 Potencial VETOR Magnético	73
A.5 a Penetração de Campos em Condutores	75
ANEXOS B – PROGRAMAS	76
B.1 Programa da Energia Máxima Dissipada (em Fortran).....	76
B.2 Programa da Energia Necessária Para Combustão (em Fortran)	81
B.3 Programa da Energia de Ativação do Combustível (em Fortran).....	85
B.4 Programa da Energia Máxima Dissipada (em Matlab).....	87
B.5 Programa da Energia Necessária Para Combustão (em Matlab)	90
B.6 Programa da Energia de Ativação (em Matlab)	93

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 O ESTUDO

Neste trabalho discutiram-se as influências que uma antena monopolo, de um quarto de comprimento de onda, acarreta em um volume próximo à fonte de emissão eletromagnética. Uma antena transforma energia eletromagnética guiada por sua linha em energia eletromagnética irradiada. O processo contrário também se verifica o que faz com que a antena seja um dispositivo essencial para a comunicação realizada por radiofrequência. Existe uma relação entre as potências que são emitidas e recebidas pelas antenas, conhecida como Lei de Friis, que não tem foco neste estudo, porém é extremamente utilizada em telecomunicações (PIRES, 2014).

A liberação de energia por uma antena em operação poderá aquecer o ambiente próximo a ela e facilitar, ou causar, o processo de combustão de um combustível cujo vapor esteja próximo de tal antena. Considerou-se, neste estudo, um ambiente contido em uma região geométrica bem definida, aproximadamente uma semiesfera, para que o estudo fosse simplificado.

1.2 TEMA

Estudo do comportamento eletromagnético de antenas de celular e as consequências de seu uso em um ambiente de manipulação e armazenagem de material combustível.

1.2.1 Delimitação do Tema

Frequentemente observam-se postos de combustíveis com informações pertinentes ao assunto "Proibido o uso de celular". O motivo para esta proibição

seria o possível risco de explosão do combustível durante o abastecimento. Apesar de não ser um fato comum, não é difícil encontrar vídeos e relatos de explosões e acidentes envolvendo o uso de telefones celulares em postos combustíveis.

Infelizmente são poucos os trabalhos e estudos feitos por pesquisadores, de um modo geral, e especialmente aos de engenharia elétrica, visando quantificar as reais influências eletromagnéticas que um aparelho celular pode causar nesses ambientes. Nessas circunstâncias, este estudo partiu da premissa de que a explosão do combustível pode ser provocada por ondas eletromagnéticas geradas pela antena do aparelho.

Para possível comprovação desta teoria, considerou-se um sistema idealizado, ocupando uma região com volume constante de mistura ar-combustível, com suas características bem definidas, tais como massa, densidade volumétrica, pressão, temperatura, condutividade elétrica.

Devido à dificuldade na obtenção dos dados de energia gerados por uma antena usada nos aparelhos celulares, os valores foram calculados e comparados aos de um sistema já desenvolvido e que possui funções de transferência já definidas: a antena do tipo monopolo de um quarto de comprimento de onda.

Os sistemas considerados são sistemas ideais, cujas condições são muito próximas as que ocorrem em um sistema real. Logo foi possível analisar a possibilidade da explosão do sistema.

1.3 PROBLEMA E PREMISSAS

A principal dificuldade para a realização do estudo esteve na obtenção de dados de resistências elétricas, permissividade elétrica, permeabilidade magnética, condutividade elétrica e entalpia, em função da temperatura e pressão de vapores do combustível em várias concentrações. Em alguns estudos foi possível encontrar alguns desses dados, os quais para este estudo foram úteis, como a condutividade elétrica da gasolina de aviação e do álcool comum (CRUZ, 2003).

Além disso, um dos maiores problemas foi determinar a exata energia gerada por uma antena de um equipamento de celular. Como neste estudo não foi possível realizar um ensaio, todo o estudo foi realizado a partir de simulações computacionais nos softwares MATLAB e FORTRAN, tendo como base uma antena do tipo monopolo de um quarto de comprimento de onda, cujo comportamento é bastante conhecido e se aproxima consideravelmente ao sistema estudado.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Determinar se existe a possibilidade de uma onda eletromagnética provocar a queima de um combustível em estado de vapor.

1.4.2 Objetivos Específicos

Considerando dados de órgãos de pesquisa e agências reguladoras, como o Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (LACTEC) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), teve-se como objetivos específicos analisar especificamente a aplicação de ondas eletromagnéticas em algumas configurações de dispositivos próximas a antenas, a potência necessária para que exista uma explosão de gasolina. Enquadram:

- a) Estudar as características físico-químicas dos combustíveis em estado gasoso;
- b) Estudar a propagação e a potência transmitida de ondas eletromagnéticas em antenas de celular;
- c) Calcular a potência gerada nas proximidades da antena devido a uma onda eletromagnética, através do vetor de Poynting;

- d) Realizar cálculos de potência dissipada em algumas topologias padrão nas proximidades da antena;
- e) Calcular sobre a energia necessária para provocar a explosão de gasolina em estado gasoso em função de sua condutividade elétrica;
- f) Criar um programa de simulação em MATLAB e FORTRAN;
- g) Analisar e discutir resultados obtidos.

1.5 JUSTIFICATIVA

Algumas demonstrações sem cálculos avançados e sem condições bem definidas, veiculadas a canais de TV fechada, apontam que é remota a possibilidade de explosão de combustível causada por um aparelho celular. As causas de uma possível explosão inicialmente seriam apontadas como sendo faiscamento ou mesmo um defeito no aparelho coincidindo com o momento de abastecimento de um veículo ou, ainda, situação que o aparelho esteja próximo a um local onde exista um depósito de combustível. Além disso, é possível imaginar também que a causa seja a eletricidade estática, que geraria uma diferença de potencial entre o usuário e o aparelho, acarretando em uma descarga elétrica instantânea, a qual poderia ser causadora de uma explosão.

Um aparelho celular é um dispositivo hermeticamente fechado, além de operar em escalas de corrente e tensão muito baixas (miliampères e milivolts), o que tornaria essa hipótese pouco provável. Em razão disso, imaginou-se que fosse possível existir outro fator não visível e não tão perceptível: dissipação de ondas eletromagnéticas pela antena do aparelho celular.

Em 19 de novembro de 2007 por volta das duas horas da madrugada em um posto de gasolina da Shell, em Pinheiros, zona oeste de São Paulo, ocorreu um acidente que vitimou frentista Carlos Roberto dos Santos, de 45 anos. As imagens do circuito interno mostram que um caminhão totalmente carregado com gasolina chegou para reabastecer os reservatórios do posto. Santos subiu no caminhão e abriu as saídas de ar que ficam na parte superior do veículo, procedimento padrão

adotado pelas empresas de combustíveis. Após, com a saída do vapor de gasolina pela abertura e com o ambiente carregado de tal substância, seu telefone soou, o que o motivou colocar a mão no bolso e pegar seu celular. No momento em que atendeu, ocorreu a explosão. A vítima trabalhava a mais de dois anos no local e era o responsável por abastecer os tanques de armazenamento de combustível do posto, durante a madrugada, período considerado mais seguro para esse procedimento.

Segundo Moacyr Duarte, engenheiro brasileiro especializado em segurança, numa entrevista ao Jornal Nacional, o aparelho pode ter sido o causador. Porém seu raciocínio se orientou à possibilidade da explosão ter sido causada pelo faiscamento dos circuitos internos do aparelho e sua bateria. Duarte já estudou o fato, a cerca de dez anos, colocando um aparelho celular em cima de um tijolo umedecido com gasolina líquida. Após telefonar para o número do aparelho, na trigésima ligação o ambiente explodiu.

Sabe-se que equipamentos eletrônicos, de um modo geral, são hermeticamente fechados, impossibilitando que faíscas elétricas alcancem material comburente nas imediações do telefone celular. Existem pequenos chaveamentos nos transistores que por sua vez também são equipamentos que possuem seus contatos isolados do ambiente e, além disso, todo o circuito é envolvido por outros materiais isolantes.

Com base nos fatos, a hipótese imaginada, para a elaboração deste trabalho, foi que uma onda eletromagnética, emitida e recebida pela antena do celular, fosse a responsável pela combustão da gasolina na região do aparelho.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Divididas nas seguintes etapas:

- a) Coleta de dados referentes às características físico-químicas da gasolina, através de tabelas presentes em livros de química e combustão;
- b) Pesquisa de sistemas e equações desenvolvidas para a queima de combustíveis;

- c) Após analisar as equações, as simulações em ambiente computacional alimentam o sistema com dados de temperatura, pressão, volume de combustível e outros necessários. O programa irá calcular a energia emitida pela antena do aparelho celular e comparada à energia necessária para o processo de explosão do combustível em estado gasoso;
- d) A comparação da energia dissipada por uma antena e a energia necessária para explosão fornece os resultados aproximados ao real e podem contribuir para um aumento na probabilidade de que haja uma explosão.

1.7 ESTRUTURAS DO TRABALHO

O trabalho dividir-se-á em partes fundamentais descritas a seguir.

1.7.1 Fundamentação Teórica e Síntese

Como premissa, estudou-se um caso ideal, com dados de pesquisas nas áreas de química para aspectos do combustível gasoso e de antenas para transmissão de potência. O capítulo 2 apresenta o estudo das antenas, utilizando os conceitos apresentados no apêndice A, que é a fundamentação teórica eletromagnética. Ainda no capítulo 2, estão informações pertinentes, como dados de manual. São apresentadas informações de fabricantes de aparelhos celular referentes à energia que o aparelho dissipa em seus estados de uso.

O capítulo 3 é destinado ao estudo físico-químico do combustível, trazendo definições das grandezas envolvidas no processo. Explana-se a respeito das equações que regem o processo de queima de combustível.

O Capítulo 4 apresenta os passos utilizados para a simulação dos programas criados em MATLAB e FORTRAN, que calculam a energia dissipada em

um volume definido próximo à antena. Além disso, traz os resultados de algumas das simulações mais convenientes aos resultados desejados.

O Capítulo 5 revela os resultados encontrados em função dos parâmetros utilizados, enquanto o capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo.

1.7.2 Simulação

Devido à complexidade do sistema, o trabalho de experimentação foi todo desenvolvido em ambiente computacional. O capítulo 4 descreve o programa, enquanto o capítulo 5 apresenta os resultados obtidos. Como variáveis, podem-se ter a concentração e condutividade do combustível, volume da região interessante ao estudo, temperatura, frequência do sinal e outros.

1.7.3 Análise dos dados e conclusão do estudo

Em tabelas e gráficos específicos que possuem as características físico-químicas da gasolina, constam valores da condutividade da gasolina em diferentes valores de concentração e em diferentes combinações de pressão e temperatura, calculadas em volumes pertinentes.

Para cada valor de entalpia, e com os equacionamentos obtidos para uso em motores, são determinados diversos valores críticos onde a energia interna do sistema explodirá o combustível. Com o software desenvolvido no *MATLAB* e *FORTRAN*, uma segunda planilha mostra a energia gerada pela antena, simulada nas mesmas superfícies onde a primeira planilha determinou seus valores de energia de ativação. A fim de evitar erros na conclusão, a comparação entre os dados será feita analiticamente. Por fim, nas conclusões, é dada a sentença sobre os riscos presentes relativos ao uso do aparelho celular nos ambientes próximos a equipamentos de telefonia móvel e reservatórios de combustível, como postos, distribuidoras e refinarias.

CAPÍTULO 2 - ANTENAS

Uma antena é qualquer dispositivo que irradia campos eletromagnéticos pelo espaço, com campos originando-se a partir de uma fonte que alimenta a antena através de uma linha de transmissão ou guia de ondas. Uma guia de ondas é uma estrutura através da qual as ondas eletromagnéticas podem ser transmitidas de um ponto a outro e dentro das quais os campos estão confinados até certo ponto.

A antena, considerando o modelo *For Field*, serve como uma interface entre a linha confinante e o espaço quando usada como transmissor – ou entre o espaço e a linha quando usada como um receptor (HAYT, 2003).

2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ANTENAS

Seja um filamento de corrente (de seção transversal infinitamente pequena) como uma fonte variante no tempo, posicionada dentro de um meio infinito sem perda. O comprimento diferencial do filamento deverá ser pequeno quando comparado com o comprimento de onda. Além disso, considera-se uma corrente I_0 neste pequeno comprimento, sem preocupação com as descontinuidades das extremidades do diferencial comprimento e considerando que a distribuição de corrente não pode ser modificada por qualquer campo que ela produz (HAYT, 2003).

Aplicando a expressão correspondente ao Potencial Vetor Magnético

$$\vec{A} = \oint \frac{\mu_0 I dL}{4\pi R} \quad (001)$$

com I sendo uma função do tempo retardado ($t-r/v$). Quando uma frequência única é usada para excitar a antena, v é a velocidade de fase naquela frequência. Como o pequeno filamento considerado não precisa de uma integração, tem-se:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I d}{4\pi r} \vec{a}_z \quad (002)$$

onde d é o pequeno comprimento, e a direção considerada refere-se à antena na vertical. Para a situação, em qualquer ponto P, distante r da origem, o potencial vetor está retardado de r/v e a corrente $[I]$ torna-se:

$$I = I_0 \cos(\omega t) = I_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{v} \right) \right] \quad (003)$$

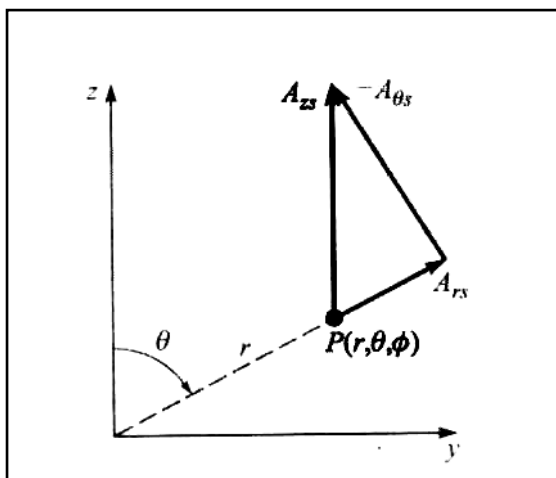


Figura 1: Corrente da antena e suas componentes
Fonte: HAYT

Assim, a expressão pode ser escrita como:

$$A_z = \frac{\mu_0 I_0 d}{4\pi R} \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{v} \right) \right] \quad (004)$$

o que pode ser escrito em termos complexos como:

$$A_z = \frac{\mu_0 I_0 d}{4\pi R} e^{-j\omega R/v} \quad (005)$$

Passando para coordenadas esféricas vem que:

$$A_r = A_z \cos \theta \quad (006)$$

$$A_\theta = -A_z \sin \theta \quad (007)$$

Porém, sabe-se que pela equação (A.2.1.2) e por (A.4.1) que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \nabla \times \vec{A} \quad (008)$$

e resolvendo as derivadas indicadas resulta em:

$$\vec{H}_\phi = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} A_r \quad (009)$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r \frac{\mu_0 I_0 d}{4\pi r} e^{-j\omega r/v} \text{sen} \theta \right) - \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_0 I_0 d}{4\pi r} e^{-j\omega r/v} \text{cos} \theta \right) \quad (010)$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{j\omega \mu_0 I_0 d}{v 4\pi r} e^{-j\omega r/v} \text{sen} \theta + \frac{1}{\mu r} r \frac{\mu_0 I_0 d}{4\pi r} e^{-j\omega r/v} \text{sen} \theta \quad (011)$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{I_0 d}{4\pi} \text{sen} \theta \left(\frac{j\omega}{v} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-j\omega r/v} \quad (012)$$

Como a corrente está no sentido de z, observa-se que a única componente de \vec{H} pode ser em ϕ . Desse modo:

$$\vec{H}_r = \vec{H}_\theta = 0. \quad (013)$$

Por consequência, só existirá Campo Elétrico nas direções de r e θ . Seja a equação (A.2.5.6), sem correntes de convecção e condução,

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (014)$$

que pode ser escrita na forma complexa

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E} \quad (015)$$

Em coordenadas esféricas pode-se expandir o rotacional para:

$$\vec{E}_r = \frac{1}{j\omega \epsilon} \frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (H_\phi \text{sen} \theta) \quad (016)$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(-\frac{1}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} (rH_\phi) \quad (017)$$

o que resulta em:

$$\vec{E}_r = \frac{I_0 d}{2\pi} \cos\theta \left(\frac{1}{\epsilon v r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon r^3} \right) e^{-j\omega r/v} \quad (018)$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{I_0 d}{4\pi} \sin\theta \left(\frac{j\omega}{\epsilon v^2 r} + \frac{1}{\epsilon v r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon r^3} \right) e^{-j\omega r/v} \quad (019)$$

Para simplificar a interpretação dos termos entre parênteses, fazem-se as substituições:

$$\omega = 2\pi f \quad (020)$$

$$v = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (021)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (022)$$

o que produz como equações finais:

$$\vec{H}_\phi = \frac{I_0 d}{4\pi} \sin\theta \left(j \frac{2\pi}{\lambda r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-j2\pi r/\lambda} \quad (023)$$

$$\vec{E}_r = \frac{I_0 d \eta}{2\pi} \cos\theta \left(\frac{1}{r^2} + \frac{\lambda}{j2\pi r^3} \right) e^{-j2\pi r/\lambda} \quad (024)$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{I_0 d \lambda}{4\pi} \sin\theta \left(j \frac{2\pi}{\lambda r} + \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda}{j2\pi r^3} \right) e^{-j2\pi r/\lambda} \quad (025)$$

O termo exponencial indica uma propagação para fora da origem na direção positiva de r. As complicações na resolução das equações causadas pelos termos

entre parênteses, que são funções complexas de r , podem ser desprezadas ao determinar o comprimento de onda, pois é uma equivalência à determinação do comprimento de onda em uma grande distância da origem (HAYT, 2003).

Desse modo, pode-se escrever:

$$\vec{E}_\theta = \eta \vec{H}_\phi \quad (026)$$

Para obter-se uma expressão quantitativa para a potência irradiada, precisa-se do Vetor de Poynting.

$$\vec{E} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\theta & \vec{e}_\phi \\ E_r & E_\theta & E_\phi \\ H_r & H_\theta & H_\phi \end{vmatrix} \quad (027)$$

Considerando as condições anteriores e os resultados nulos demonstrados, vem:

$$\vec{E} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\theta & \vec{e}_\phi \\ 0 & E_\theta & E_\phi \\ 0 & 0 & H_\phi \end{vmatrix} = E_\theta H_\phi \vec{e}_r \quad (028)$$

o que resulta em:

$$\vec{E} \times \vec{H} = \left(\frac{I_0 d}{2\lambda r} \right)^2 \eta \text{sen}^2 \theta \text{sen}^2 \left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda} \right) \quad (029)$$

A potência total (no espaço) instantânea (no tempo) que cruza a superfície de uma esfera de raio r_o é então:

$$P = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \left(\frac{I_0 d}{2\lambda r} \right)^2 \eta \text{sen}^2 \theta \text{sen}^2 \left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda} \right) r_o^2 \text{sen} \theta d\theta d\phi \quad (030)$$

$$P = \left(\frac{I_0 d}{\lambda} \right)^2 \eta \frac{2\pi}{3} \text{sen}^2 \left(\omega t - \frac{2\pi r_o}{\lambda} \right) \quad (031)$$

Para o cálculo da energia dissipada pela antena, baseado em tópicos anteriores, é possível calcular a Energia a ser dissipada pela antena. Seja o campo Elétrico \vec{E} dado em coordenadas esféricas:

$$\vec{E} = E_r \vec{a}_r + E_\theta \vec{a}_\theta \quad (032)$$

Seu módulo será dado por:

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\theta^2} \quad (033)$$

Sabe-se que o Campo Magnético é perpendicular ao Campo Elétrico, então:

$$\vec{H} = H_\phi \vec{a}_\phi \quad (034)$$

Sabe-se ainda que a Densidade de Energia Eletrostática é dada por

$$\omega_{ve} = \frac{\epsilon E^2}{2} \quad (035)$$

Assim, a Energia da distribuição será dada por:

$$W_e = \int_V \omega_{ve} dV = \int_V \frac{\epsilon E^2}{2} dV \quad (036)$$

Pode-se concluir que:

$$dW_e = \omega_{ve} dV \quad (037)$$

e:

$$dW_e = \frac{\epsilon E^2}{2} dV \quad (038)$$

Analogamente, pode-se concluir:

$$dW_M = \frac{\mu H^2}{2} dV \quad (039)$$

Assim sendo, a energia total será dada por:

$$dW = \frac{\varepsilon E^2}{2} dV + \frac{\mu H^2}{2} dV \quad (040)$$

Reajustando tem-se:

$$dW = \frac{1}{2} (\varepsilon E^2 + \mu H^2) dV \quad (041)$$

Ao trabalhar com coordenadas esféricas, tem-se o dV substituído por (A.1.3.11). Então:

$$dW = \frac{1}{2} (\varepsilon E^2 + \mu H^2) r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr \quad (042)$$

Pode-se ainda ser afirmado que a potência dissipada em função da condutividade elétrica do meio, necessária para causar a combustão pode ser dada por (ASSUMPÇÃO, 2008):

$$P = \iiint_V \sigma E^2 dV \quad (043)$$

e a energia dissipada por um período de aproximadamente dois segundos seria:

$$E = 2 \iiint_V \sigma E^2 dV \quad (044)$$

2.2 ANTENAS DIPOLO

É uma antena com dois condutores, tendo como comprimento de onda captado o mesmo que o seu comprimento, dependendo do parâmetro frequência de operação e necessidade técnica desejada. Pode ser utilizada ainda, dependendo da necessidade, uma antena dipolo de meia onda, com o tamanho da metade do comprimento de onda. Pode ser considerada uma antena reta sem ligação com o potencial de terra, com uma extensão de um comprimento de onda.

As mais utilizadas são de meia onda e um quarto de onda, devido a questões práticas. Pode ser polarizada horizontalmente ou verticalmente; devido a onda eletromagnética ser composta de campo elétrico e magnético, que são ortogonalmente dispostos, a polarização desses tipos de onda resulta em ângulo reto entre o campo elétrico e o magnético, além de defasamento nulo entre os mesmos.

Em se tratando de antena dipolo, a polarização é definida pelo campo elétrico, ou seja, se o campo elétrico está na horizontal, terá a polarização do dipolo como horizontal, enquanto que o campo elétrico estando na vertical, terá polarização da antena dipolo como vertical (FURTADO, 2014).

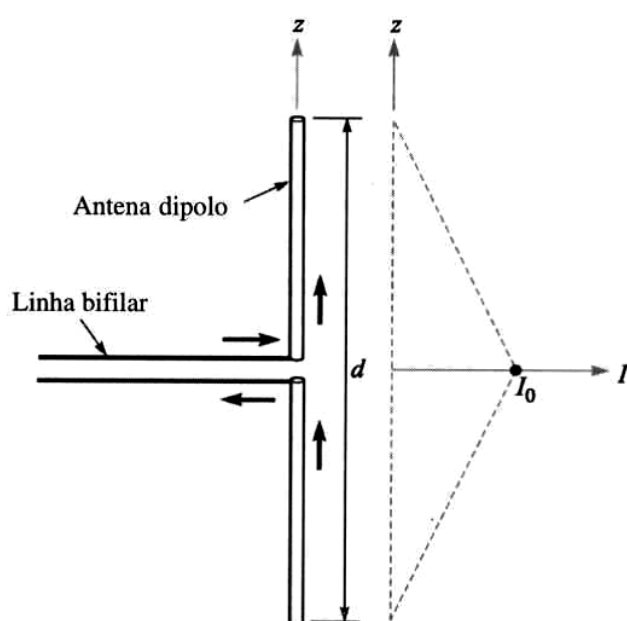


Figura 2: Antena Dipolo
Fonte: HAYT

2.3 ANTENAS MONOPOLO

Será uma classe de antenas de rádio que tem linha reta em forma de haste, muitas vezes montada perpendicularmente sobre algum tipo de condutor na superfície, chamado de plano de terra. O sinal do acionamento a partir do transmissor é aplicado para antenas de recepção do sinal. Um dos lados da antena linha de alimentação está ligado à extremidade inferior do monopolo, e do outro lado

está ligada ao plano de terra, que é muitas vezes o condutor aterrado. Isto contrasta com uma antena dipolo que é constituída por dois condutores de haste idênticos, com o sinal do transmissor aplicado entre as duas metades da antena.

O comprimento da antena é determinado pelo comprimento de onda das ondas de rádio. A forma mais comum é a monopolo de quarto de onda, em que a antena é aproximadamente 1/4 do comprimento de onda das ondas de rádio (MACNAMARA, 2003).

2.4 ANTENAS MONOPOLO SINUOSO

A antena a ser utilizada neste estudo é um monopolo sinuoso, de modo simplificado. A sua impedância depende do modo utilizado. As medidas são apresentadas na Figura 3.

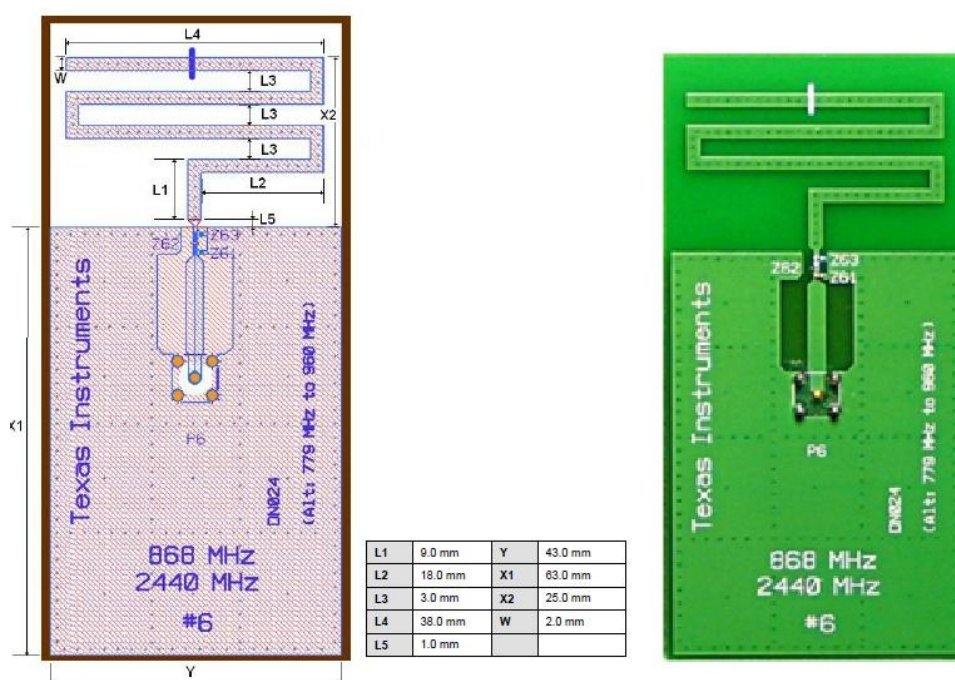


Figura 3: Antena do tipo monopolo sinuoso

Fonte: TEXAS

É uma antena de circuito impresso que pode ser configurado em dois diferentes modos de operação: a antena pode ser usada para uma única frequência para operação de 868 MHz (Europa), 915 MHz (EUA) e 920 MHz (Japão) bandas ISM; ou antena pode ser configurada como uma banda dupla antena, que pode operar a 868 MHz e 2440 MHz.

Quando comprimento de L4 é mantido como mostrado então isso é benéfico para o Modo Dual Band. Se L4 é reduzido para a serigrafia de marcação, então isso é benéfico para o Modo Band único. A geometria da placa afeta a impedância da antena. Existe o problema do encapsulamento plástico e outros objetos nas imediações da antena. O layout da antena está posicionado sobre a camada superior e inferior da placa; permite a esta menor perda de resistência e dá uma largura de banda ligeiramente maior comparado a um único layout de face. Com uma única disposição, a área debaixo da antena não pode ser utilizada para qualquer outro encaminhamento. Por isso é mais útil para utilizar esta área para aperfeiçoar o desempenho da antena (TEXAS, 2014).

2.5 DADOS DE MANUAIS DE APARELHOS CELULARES



Figura 4: Aparelho Celular
Fonte: FABRICANTE

De acordo com o fabricante, este dispositivo móvel cumpre os requisitos relativos à exposição de ondas de rádio. É um transmissor e receptor de rádio. Foi concebido de forma a não exceder os limites de exposição a ondas de rádio recomendados pelas diretrizes internacionais. Estas diretrizes foram desenvolvidas pela organização científica independente ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) e incluem margens de segurança, de modo a garantir

a segurança de todas as pessoas, independentemente da idade e do estado de saúde.

As normas de exposição para dispositivos móveis utilizam uma unidade de medição, designada por SAR (Taxa de Absorção Específica). O limite de SAR especificado nas diretrizes da ICNIRP é de 2,0 watts/quilograma (W/kg), calculados sobre 10 gramas de tecido corporal. Os testes de SAR são realizados utilizando posições de funcionamento padrão, com o dispositivo a transmitir ao seu mais elevado nível de potência certificada, em todas as bandas de frequência testadas. O nível real de SAR de um dispositivo, quando está a funcionar, pode situar-se muito abaixo do valor máximo, devido ao fato de o dispositivo ter sido concebido de modo a utilizar apenas a energia necessária para alcançar a rede. Este valor pode mudar em função de diversos fatores como, por exemplo, a distância em que se encontra de uma estação base da rede.

O valor de SAR mais elevado, nos termos das diretrizes da ICNIRP para a utilização do dispositivo junto ao ouvido, é de 1,51 W/kg. A utilização de acessórios e melhoramentos com o dispositivo pode alterar os valores de SAR. Os valores de SAR podem variar em função dos requisitos de registo e teste nacionais, bem como da banda da rede (FABRICANTE, 2014).

2.5.1 Ambientes potencialmente explosivos

De acordo com o manual do fabricante, o dispositivo deve ser desligado quando estiver em qualquer área com um ambiente potencialmente explosivo, por exemplo, próximo de bombas de gasolina em estações de serviço. Faíscas nessas áreas poderão causar uma explosão ou incêndio, tendo como resultado lesões pessoais ou a morte. Observar as restrições em estações de serviço, armazenamento e distribuição de combustível, fábricas de químicos ou locais onde sejam levadas a cabo operações que envolvam a detonação de explosivos é uma das medidas de segurança.

As áreas com um ambiente potencialmente explosivo estão frequentemente, mas não sempre, claramente identificadas. Entre essas áreas, contam-se os locais

em que normalmente as pessoas seriam advertidas no sentido de desligar o motor do seu veículo, porões de navios, instalações de transferência ou armazenamento de químicos e áreas em que se verifique a presença de químicos ou partículas no ar, como grão, pó ou limalhas. Devem-se consultar os fabricantes de viaturas de gás de petróleo liquefeito (como o gás propano ou butano) para determinar se este dispositivo pode ser utilizado com segurança na sua vizinhança (FABRICANTE, 2014).

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DA GASOLINA

3.1 TERMODINÂMICA

A termodinâmica pode ser definida como a ciência da energia. Tal energia pode ser entendida como a capacidade de causar alterações. A palavra termodinâmica vem do grego *thérme* (calor) e *dýnamis* (força), que descreve bem os primeiros esforços de converter calor em força. Atualmente é amplamente interpretada para incluir todos os aspectos de energia e suas transformações, entre elas a geração de energia elétrica, a refrigeração e as relações que existem entre as propriedades da matéria.

Uma das leis mais fundamentais da natureza é o princípio de conservação de energia, que diz que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas que a quantidade total permanece constante (BOLES, 2013).

3.2 TRABALHO E ENERGIA

A propriedade fundamental em termodinâmica, no sentido que fornece uma base para a definição de seu principal conceito, é o trabalho. É realizado trabalho quando um peso é levantado contra a força da gravidade. A reação em uma bateria realiza trabalho quando empurra uma corrente elétrica em um circuito. O gás em um cilindro, como o que ocorre no pistão de um motor de automóvel, realiza trabalho quando empurra o pistão, dentre outras formas (RUSSELL, 2010).

O Trabalho W realizado por, ou sobre, um sistema avaliado em termos de forças e deslocamentos observáveis macroscopicamente é dado por:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (045)$$

onde \vec{F} é o vetor força, \vec{s} é relativo ao caminho do deslocamento, sendo S_1 e S_2 suas extremidades (MORAN, 2013).

Em termodinâmica, a capacidade total de um sistema realizar trabalho é chamada de energia interna, representada por U . Um gás comprimido tem mais energia interna antes de se expandir do que depois da expansão ou uma bateria carregada tem mais energia interna do que uma bateria descarregada. De um modo geral existe uma convenção de sinais desse trabalho: sempre que o trabalho é realizado pelo sistema, considera-se $W > 0$; sempre que o trabalho for realizado sobre o sistema, considera-se $W < 0$ (MORAN, 2013).

Desse modo, sempre que um trabalho é realizado sobre um sistema, sua energia interna aumenta. Comprimir um gás dentro de um recipiente isolado termicamente aumenta sua energia interna, pois um gás comprimido pode realizar mais trabalho que um gás descomprimido.

Na termodinâmica aplicada à engenharia, considera-se que a variação da energia total de um sistema é composta de três contribuições macroscópicas. Uma é a variação da energia cinética, associada ao movimento do sistema como um todo em relação a um sistema de coordenadas externo. Outra é a variação da energia potencial gravitacional, associada à posição do sistema como um todo no campo gravitacional terrestre (MORAN, 2013). As demais variações de energia são reunidas na energia interna do sistema, que é uma propriedade extensiva do sistema. A variação total da energia interna de um sistema é:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (046)$$

3.3 CALOR

Os sistemas fechados também podem interagir com suas vizinhanças, de uma forma que não pode ser definida como trabalho. Um exemplo considerável é um gás compreendido em um recipiente rígido, interagindo com uma placa quente. A energia do gás aumenta, mesmo sem que nenhum trabalho seja realizado (MORAN, 2013).

Em termodinâmica, calor é a energia transferida como resultado de uma diferença de temperatura. A energia flui como calor de uma região de maior

temperatura para uma região de menor temperatura. Portanto, em um sistema com paredes sem isolamento térmico, se o sistema está mais frio que suas vizinhanças, a energia flui das vizinhanças para o sistema e a energia interna aumenta. O verbo aquecer significa transferir energia como calor, isto é, fazendo uso da diferença de temperatura. A quantidade de energia transferida como calor é medida, no Sistema Internacional, em joules, J. A energia que é transferida para o sistema como calor é representada por Q . Se a energia entra no sistema como calor, Q é positivo. Caso contrário, será negativo (RUSSELL, 2010).

A quantidade de calor transferida depende dos detalhes do processo e não apenas dos estados inicial e final (MORAN, 2013). Assim, da mesma forma que o trabalho, o calor não é uma propriedade, e sua diferencial é escrita como:

$$Q = \int_1^2 \delta Q$$

em que os limites 1 e 2 significam “do estado 1 para o estado 2”. A taxa de transferência de calor líquida é representada por \dot{Q} . A quantidade de energia transferida sob a forma de calor durante um período de tempo pode ser calculada integrando-se do tempo t_1 até o tempo t_2 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt . \tag{047}$$

Como um balanço de energia para sistemas fechados, pode-se considerar que a variação da quantidade de energia contida no sistema durante certo intervalo de tempo será igual a quantidade líquida de energia transferida para dentro através da fronteira do sistema por transferência de calor durante o intervalo de tempo subtraída a quantidade líquida de energia transferida para fora através da fronteira do sistema por trabalho durante o intervalo de tempo (MORAN, 2013).

Em termos de expressão tem-se:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q - W \tag{048}$$

3.4 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

O primeiro passo numa análise termodinâmica é definir o sistema. Só depois da especificação da fronteira do sistema é possível considerar as interações de calor com a vizinhança.

Joule deduziu experimentalmente que o valor do trabalho líquido é o mesmo para todos os processos adiabáticos entre dois estados de equilíbrio. Em outras palavras, o valor do trabalho líquido realizado por ou sobre um sistema fechado que passa por um processo adiabático entre dois estados dados depende somente dos estados inicial e final, e não dos detalhes do processo adiabático.

Com base nisso, a variação de energia entre dois estados é definida por:

$$E_2 - E_1 = -W \quad (049)$$

sendo E a energia do sistema e W o trabalho. O sinal negativo antes do termo do trabalho está de acordo com a convenção de sinais para o trabalho, mencionada no item anterior. De um modo geral a taxa de variação temporal da energia contida no sistema no tempo t é igual a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro por transferência de calor no tempo t, subtraída a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para fora por trabalho no tempo t (MORAN, 2013).

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dEc}{dt} + \frac{dEp}{dt} = d\dot{Q} - d\dot{W} \quad (050)$$

3.5 ENTALPIA

A palavra entalpia vem do grego *enthalpien* (aquecer). Foi introduzido na década de 1930 por existir amplo uso da propriedade a qual significa.

A função de estado que permite obter informações sobre as variações de energia à pressão constante é chamada de entalpia, H. Para um sistema composto interagindo com uma fonte de pressão, o estado de equilíbrio minimiza a entalpia para os vários estados de pressão constante (igual à fonte).

A entalpia é uma função natural. É, portanto, particularmente vantajosa na análise de problemas nos quais a pressão é mantida constante por uma fonte de pressão. Nos processos conduzidos recipientes abertos, a atmosfera atuará como fonte e a entalpia pode ser considerada como trabalho utilizável, desde que esteja em contato simultâneo com a fonte de pressão e uma fonte de trabalho reversível. (CALLEN, 2008).

Se não ocorre uma variação no volume de um sistema e nenhum trabalho de expansão é realizado, então a variação na energia interna é igual à energia fornecida ao sistema como calor (RUSSELL, 2010). Desse modo:

$$H = U + PV \quad (051)$$

onde U, P e V são a energia interna, pressão e o volume do sistema, respectivamente. Quando um sistema sofre uma transformação à pressão constante, o calor absorvido durante o processo é igual à variação de entalpia do sistema. Usando o conceito da primeira lei da termodinâmica, uma variação na entalpia de um sistema é igual ao calor liberado ou absorvido à pressão constante.

Assim, a variação de entalpia será:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (052)$$

que substituída em (050) resulta:

$$\Delta H = Q + W + P\Delta V. \quad (054)$$

Vale lembrar ainda da lei dos gases ideais:

$$PV = nRT \quad (055)$$

em que n é o mols de gás, R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura em Kelvin.

A lei de Hess é uma das mais importantes da combinação de entalpias. A entalpia total da reação é a soma das entalpias de reação dos passos em que a reação pode ser dividida. Aplica-se mesmo se as reações intermediárias, ou a reação total, não possam, de fato, ser realizadas.

3.6 COMBUSTÃO

Qualquer queima real de combustível não representa a combustão com sua composição estequiométrica. O fenômeno de combustão é de natureza muito complexa da qual as velocidades das reações, as condições de transferência de calor e a massa, falta local ou global de oxigênio, ou por efeito de extinção da frente de chama nas paredes podem impossibilitar a combustão completa.

Geralmente, a combustão real ocorre com excesso ou insuficiência de ar. Se as reações forem conhecidas, a composição final dos produtos de combustão pode ser calculada, em se supondo um equilíbrio termodinâmico realizado, dentro de condições de pressão e temperatura dos gases observados após a combustão. Na prática, levando-se em conta as baixas velocidades da maioria destas reações, o estado real dos produtos está longe do equilíbrio, daí a presença de poluentes na saída do escapamento de veículos, por exemplo (FERNANDES, 2014).

3.6.1 Combustão Completa e Incompleta

É possível subdividir a combustão em dois tipos distintos (BOLES, 2013):

Combustão completa: definido quando todo o carbono do combustível PE queimado em CO_2 , todo o hidrogênio é queimado é H_2O e todo o enxofre, se houver, é queimado em SO_2 . A quantidade mínima de ar necessária para a completa combustão de um combustível é chamada de ar teórico. A combustão completa ocorre na abundância de oxigênio, produzindo calor e chamas. Seus produtos principais, no caso da gasolina, são gás carbônico (CO_2) e o vapor d'água (H_2O).

Combustão incompleta: da mesma forma como ocorre na combustão completa, o processo de combustão incompleta ocorre quando há falta de oxigênio, produzindo calor e pouca, ou nenhuma, chama, produzindo C, H_2 , CO ou OH. Seu produto final principal é o monóxido de carbono e vapor de água. Porém, a energia liberada neste tipo de combustão é menor.

Para tanto, a energia de ativação utilizada neste trabalho, será a mesma para todos os tipos de combustão, e esse valor representa apenas a energia necessária para elevar a temperatura da gasolina (C_8H_{18}) até a temperatura de combustão.

3.6.2 Pontos de fulgor, combustão e ignição

Todos os tipos de reações de combustão de líquidos apresentam três temperaturas notáveis (CBMERJ, 2014). Consideraram-se os dados aplicados a uma pressão atmosférica.

Ponto de fulgor: é a menor temperatura na qual um combustível específico libera vapores suficientemente para que, em conjunto com o ar, possa ser inflamado por uma fonte externa de calor (os combustíveis só podem entrar em ignição no estado gasoso). Porém, nessa temperatura o combustível não consegue manter-se em combustão, ou seja, a partir do momento que a fonte externa responsável por ceder a energia de ativação ao sistema cessar, a reação de combustão se encerrará. O ponto e fulgor da gasolina é aproximadamente $-43^{\circ}C$ (BR,2014).

Ponto de combustão: é a temperatura mínima na qual a mistura ar/combustível pode ser inflamada por uma fonte externa de calor, mantendo a combustão mesmo após a retirada dessa fonte. O ponto de combustão da gasolina é aproximadamente $314^{\circ}C$ (CETESB,2014).

Ponto de ignição: é a temperatura necessária para que os vapores de um combustível possam ser inflamados sem a presença de uma fonte externa de calor. Para temperaturas acima do ponto de ignição, acontece a combustão espontânea. O ponto de ignição da gasolina é aproximadamente $400^{\circ}C$ (CETESB,2014).

3.6.3 LSE e LIE

Importantes pontos que devem ser observados em uma atmosfera inflamável são os limites de explosividade, ou seja, existe uma faixa de

concentrações ar/combustível onde existe, ou não, a possibilidade da propagação de chamas (SOLER, 2014). Existem dois limites:

LIE: Limite inferior de explosividade - ponto em que a concentração da mistura é baixa (e mínima necessária) para permitir que o vapor possa ser inflamado. Para gasolina este valor é de 1,4%.

LSE: Limite superior de explosividade - ponto onde a concentração da mistura é rica (máxima possível) para permitir que o vapor seja inflamado. Para a gasolina este valor é de 7,6%.

3.6.4 Calor Específico e Calor Latente

Para variar a temperatura de uma substância, é necessário que ela troque calor com ambiente. Para tanto existe uma propriedade denominada capacidade calorífica (C), que determina a facilidade com que uma substância varia sua temperatura. O Calor específico é definido como a energia necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de uma substância. Utilizando o princípio de conservação de energia:

$$e_{entra} - e_{sai} = \Delta e_{sistema} \quad (056)$$

Expressando no modo diferencial:

$$\delta e_{entra} - \delta e_{sai} = dU .$$

O lado esquerdo dessa equação representa a quantidade de energia líquida transferida para o sistema. Pela definição de calor específico a volume constante, tem-se que:

$$c_v dT = dU . \quad (057)$$

Assim, pode-se escrever similarmente o calor específico a pressão constante nos formatos:

$$c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (058)$$

$$c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (059)$$

O calor latente, também chamado de calor de transformação, pode ser definido como a quantidade de energia absorvida ou liberada durante um processo de mudança de estado físico (BOLES, 2013). É uma grandeza física que relaciona a quantidade de calor necessária para uma quantidade de massa mude de estado físico. É definido equacionalmente como:

$$L = \frac{Q}{m} \quad (060)$$

em que L é o calor latente, Q é o calor que a substância precisa ganhar ou perder para mudar de estado e m é a massa da substância (CALLEN, 2008).

3.6.5 Densidade específica

A densidade específica ρ_s de qualquer substância consiste na razão entre a massa m e o volume V por ela ocupado.

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (061)$$

Para um volume diferencial elementar de massa e volume, a densidade pode ser expressa como:

$$\rho_s = \frac{\delta m}{\delta V}. \quad (062)$$

Geralmente, a densidade de uma substância depende da temperatura e da pressão. A densidade da maioria dos gases é proporcional à pressão e inversamente proporcional à temperatura. Os líquidos e sólidos são, por sua vez,

substâncias essencialmente incompressíveis, e a variação de suas densidades com a pressão são geralmente desprezíveis.

Neste estudo trabalhou-se com vapores de gasolina e oxigênio. Entretanto, para simplificações no estudo, consideraram-se ambos como gases ideais, de equação (055). Sabe-se ainda que n relaciona-se com a massa m e a massa molar M .

$$n = \frac{m}{M} \quad (063)$$

Substituindo-se (063) em (055) vem:

$$\frac{PM}{RT} = \frac{m}{V} \quad (064)$$

O lado direito da equação representa a densidade específica. Para o estudo foi considerada uma pressão de 1atm. Substituindo vem:

$$\rho_s = \frac{m}{V} = 1,218658 \cdot 10^4 \frac{M}{T} \quad (065)$$

Assim,

$$m = 1,218658 \cdot 10^4 \frac{MV}{T} \quad (066)$$

A equação (061) será usada no programa para os cálculos de energia, utilizando as condições adequadas.

3.7 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A de ativação é a energia cinética que as partículas reagentes devem possuir para que sua colisão resulte na formação de um complexo ativado.

A energia interna do combustível irá variar apenas cedendo calor para a mistura (RUSSELL, 2010). Desse modo pode-se afirmar que:

$$Ea = Q \quad (067)$$

em que Ea representa a energia de ativação necessária para a mistura. Assim, utilizando a equação geral da energia e calor específico pode-se afirmar que:

$$Ea = mc_s \Delta T . \quad (068)$$

No combustível existem oxigênio e gasolina, ambos gasosos, cada um possuindo um calor específico e massa diferentes. Entretanto, foi calculado o calor necessário para aquecer cada uma em separado, para uma mesma variação de temperatura. Logo:

$$Ea = (m_{\text{oxigênio}} c_{s_{\text{oxigênio}}} + m_{\text{gasolina}} c_{s_{\text{gasolina}}}) \Delta T \quad (069)$$

Utilizando a equação (066) em (069) vem:

$$Ea = 1,218658 \left(\frac{V_{\text{oxigênio}} M_{\text{oxigênio}} c_{s_{\text{oxigênio}}}}{T} + \frac{V_{\text{gasolina}} M_{\text{gasolina}} c_{s_{\text{gasolina}}}}{T} \right) \Delta T \quad (065)$$

A equação (065) pode ser utilizada para determinar a energia de ativação de uma reação de combustão que contenha gasolina e oxigênio na forma de vapor. A equação não contempla os demais gases presentes, mas a aproximação da energia encontrada nesse cálculo é razoável e suficiente para o objetivo deste trabalho.

3.8 SUPERFÍCIES DE ESTUDOS

Como já demonstrado, a energia de ativação da reação depende da quantidade de gasolina e de oxigênio na forma de vapor na mistura analisada. Desse modo, cada tipo de ambiente apresentara um valor de energia de ativação e todo processo deverá ocorrer de modo isobárico, pois a pressão é constante. Também serão desconsideradas as presenças de outros gases, além do vapor de gasolina e de oxigênio.

A Tabela 1 contém dados pertinentes ao estudo da Energia de Ativação, considerando as condições normais de temperatura e pressão. A massa Molar do oxigênio é de 32 g/mol, enquanto a da gasolina é de 42 g/mol. Observa-se que conforme há aumento do raio, a energia de ativação aumenta. Isso se explica por ter-se mais combustível a ser explodido, logo é maior a energia para causar a explosão. Além disso, observou-se que a variação da energia em função da concentração tem pouca variação. Por isso, as conclusões serão similares independentemente da concentração de gasolina na mistura com oxigênio.

Tabela 1: Energia de Ativação da Gasolina

Fonte: Autor

CONCENTRAÇÃO	Raio da esfera (m)	Volume da esfera (m ³)	MASSA OXIGÊNIO (g)	MASSA GASOLINA (g)	ENERGIA DE ATIVAÇÃO NECESSÁRIA (J)
1,40%	0,001	2,094E-09	2,70E-06	5,03E-08	1,28E-03
1,40%	0,002	1,676E-08	2,16E-05	4,03E-07	1,02E-02
1,90%	0,032	6,863E-05	8,81E-02	2,24E-03	4,21E+01
2,00%	0,035	8,980E-05	1,15E-01	3,08E-03	5,52E+01
2,20%	0,047	2,174E-04	2,78E-01	8,21E-03	1,34E+02
2,20%	0,050	2,618E-04	3,35E-01	9,89E-03	1,61E+02
6,30%	0,197	1,601E-02	1,96E+01	1,73E+00	1,02E+04
7,50%	0,200	1,676E-02	2,03E+01	2,16E+00	1,08E+04

O gráfico 1 expressa a Energia de Ativação em função do aumento do raio da semiesfera. É aproximadamente um gráfico exponencial. Desse modo, conforme maior o raio, precisar-se-á de muito mais energia, comparado com um raio pouco menor.

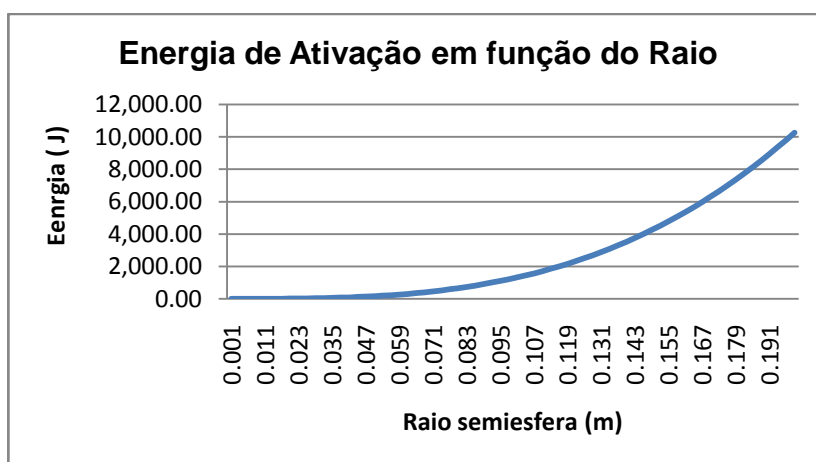


Gráfico 1: Energia de Ativação em função do Raio

Fonte: O Autor

3.9 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica é utilizada para expressar o caráter elétrico de um material ou substância. Os valores de condutividade elétrica da gasolina de aviação no estado líquido, segundo o manual técnico da Petrobrás, varia entre os valores de 50 e 450 pS/m (BR,2014). Poder-se-ia imaginar uma condutividade elétrica da gasolina em estado de vapor sendo a média ponderada entre a condutividade elétrica da gasolina e o oxigênio, porém, preferiu-se utilizar números compreendidos entre os números aceitáveis de condutividade.

CAPÍTULO 4 – SIMULAÇÃO

O cálculo da energia necessária para a explosão da gasolina por uma onda eletromagnética, emitida por uma antena monopolo de um quarto de comprimento de onda, foi feito em ambiente computacional, nos programas MATLAB (versão R2008b) e FORTRAN (versão Force209GFortran). Os programas foram escolhidos por serem amplamente conhecidos e por sua facilidade de comparação, um referente ao outro.

Todas as fórmulas e expressões utilizadas na programação foram apresentadas nos capítulos 2, 3 e nos anexos, onde constam as principais formulações vetoriais e eletromagnéticas utilizadas neste estudo. Os resultados foram comparados com valores conhecidos de problemas similares que envolvem antenas. O interesse de estudo está no *Far Field*, pois a explosão dar-se-á nas proximidades do aparelho celular.

4.1 DIFICULDADES DE PROGRAMAÇÃO

O estudo foi contemplado por haver uma aproximação do ambiente real para um ambiente mais conhecido e prático. Desse modo foi escolhida como geometria de estudo uma semiesfera. Os dados de condutividade elétrica da gasolina comum, em estado de vapor, tal como sua proporção presente no volume da semiesfera, não são conhecidos e são totalmente variáveis em função das mais diversas condições de momento.

Outro dos fatores mais importantes é a relação da corrente na antena do aparelho celular. É um dado totalmente dependente da frequência de operação, tipo da antena e impedâncias das linhas de transmissão de sinal. Porém, para este caso, foi procurada a corrente, através de simulações, capaz de gerar uma potência de 1,5 watts, dado conhecido de um modelo de aparelho celular, no qual foi baseado este estudo.

A comparação de informações de catálogos e de problemas que envolvem aparelhos foi de fundamental importância para melhor esclarecer resultados e mesmo qualificar a resposta final. Desse modo, os programas feitos nas duas

linguagens de programação acabaram fornecendo com mais precisão e principalmente veracidade as informações definitivas.

4.2 O PROGRAMA

Para o programa, utilizou-se uma frequência de 1800 MHz, que é uma das frequências utilizadas em aparelhos de telefonia celular. Foi necessário declarar os seguintes valores para os cálculos de energia:

- Permissividade Elétrica do ar, ϵ_0 ;
- Número π ;
- Permeabilidade Magnética do ar μ_0 ;
- Velocidade da Luz, calculada a partir de permeabilidade e permissividade c ;
- Comprimento de onda, calculada a partir de valores da velocidade da luz e da frequência de entrada λ ;
- Comprimento da antena, calculado a partir de um quarto de comprimento de onda L ;

A partir desses dados, foi pedido (para o usuário do programa) o raio da semiesfera, valor dado em metros, que deveria ser suficiente para calcular toda a energia que passa pela área a partir do vetor de Poynting. Além disso, foi pedida a corrente e ângulo que passaria pela antena, dada em ampères.

Foi fixado o ângulo que vai de x para y , assim como o que vai de z para o plano xy , em 180 graus. Com tais ângulos e com o valor do comprimento da antena, foi pedido ao executor a quantidade de divisões desejada, tanto para a antena, quanto para cada eixo correspondente à variação de volume. Considera-se quanto maior a divisão mais precisa a resposta.

Com todos os valores já definidos, o programa faz os ajustes e conversões adequadas para ter suas respostas nas unidades do Sistema Internacional de Unidades. Além disso, calcula os valores infinitesimais a serem incrementados no comprimento da antena, raio e ângulos que compõe o volume da semiesfera.

As iterações ocorrem da seguinte forma: primeiro calcula-se toda a energia dissipada em todo o volume para o primeiro comprimento de antena, através das variações dos dois ângulos e do raio. É guardado o valor encontrado em uma

variável separada e em seguida zeram-se todos os valores a serem aplicados na segunda iteração do comprimento da antena. Assim, sucessivamente é feito o cálculo para todas as posições da antena, considerada apenas no eixo z.

As expressões consideradas para cálculo de potência dissipada são as demonstradas no capítulo de antenas. Assim, usou-se valores aproximados e os calculados ponto a ponto, a fim de obter-se dois valores, os quais tentem a ser iguais. O Programa ainda inclui o conceito de penetração de campos em meios condutores, que é uma atenuação no valor da energia, considerando *Near Field*.

Os valores encontrados para potência foram guardados para uma comparação com os valores de energia de ativação necessária para causar a explosão do combustível. Para isso, foi criado um segundo programa, o qual calcula a energia de ativação em função do raio da esfera. Consideraram-se valores pequenos de raio para determinar a energia de ativação, pois a explosão ocorre muito próxima ao aparelho celular.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

Com todos os programas já elaborados, foi preciso buscar uma corrente que verificasse a condição de potência de 1,5 watts, que é a potência do catálogo de um fabricante de aparelho celular escolhido para o trabalho. Um dos dados mais convenientes é a utilização de um raio da semiesfera igual a 0,2 m, pois é uma distância muito superior ao comprimento da antena e está relativamente nas proximidades do aparelho celular. O Objetivo é encontrar a potência *Near Field*, pelo Vetor de Poynting, igual a 1,5 watts; a corrente encontrada no experimento será a utilizada no programa que tem a condutividade elétrica da gasolina.

Após várias simulações, realmente buscando aproximar o valor de 1,5 watts encontrado, constatou-se que com uma corrente de 0,32 ampères, defasada em 10 graus, a potência dissipada é de aproximadamente 1,547 watts, valor verificado numericamente e através da expressão da potência média dissipada por uma antena em uma região distante do ponto emissor. Para tanto foram aplicadas 40 divisões na antena e 125000 divisões no volume; os dados foram calculados para um raio de 0,2 metros e uma frequência de 1800 MHz. Tendo o valor da corrente elétrica, é possível buscar valores de energia mais próximos à fonte emissora, até um limite de 0,03 m, que é aproximadamente a distância entre a antena do celular e o ambiente externo ao aparelho.

A potência encontrada foi calculada de duas formas: primeiramente pelas expressões diretas de campo elétrico e magnético, utilizando a expressão geral do vetor de Poynting. Posteriormente pela equação da potência média aproximada, para longas distâncias da fonte, o que convergiu em 1,537 watts e confirma o valor encontrado no primeiro cálculo.

Já definido o valor da corrente elétrica que passa pela antena, é possível calcular a potência que pode ser fornecida ao combustível, através do valor de sua condutividade elétrica e uma iteração em seus volumes infinitesimais. É preciso seguir uma série de comparações em busca de um valor de energia que possa ficar próximo àquele que seja suficiente para iniciar a combustão da gasolina.

Para contemplar uma solução e conclusão ao estudo, é preciso encontrar a energia de ativação necessária para iniciar a combustão. A energia de ativação é dependente do raio da semiesfera analisada e da condutividade elétrica do combustível, que é um dos dados imprecisos que está contido nos resultados.

Para buscar um valor coerente, foram feitas sucessivas simulações variando apenas o valor da condutividade elétrica da gasolina em estado de vapor. Comparando com os valores da condutividade elétrica do álcool e da gasolina de aviação, citadas no capítulo de estudo dos combustíveis, foi considerado que a condutividade elétrica da gasolina assume valores entre 500 uS/m e 500 pS/m.

A tabela 2 contém os resultados das simulações usando variados valores de condutividade elétrica.

Tabela 2: Valores de energia de ativação em função da condutividade elétrica
Fonte: O Autor

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA S/m	ENERGIA DE ATIVAÇÃO (J)
10^0	38699.98
10^{-1}	467.17
10^{-2}	47.38
10^{-3}	4.76
10^{-4}	0.47
10^{-5}	0.0477
10^{-6}	0.0048
$5 \cdot 10^{-7}$	0.0024
10^{-7}	0.0005

Através dos valores encontrados, é possível montar o gráfico 2, a potência dissipada em função da condutividade elétrica. O gráfico mostra que a potência sofre grandes alterações conforme se substitui valores maiores de condutividade elétrica.

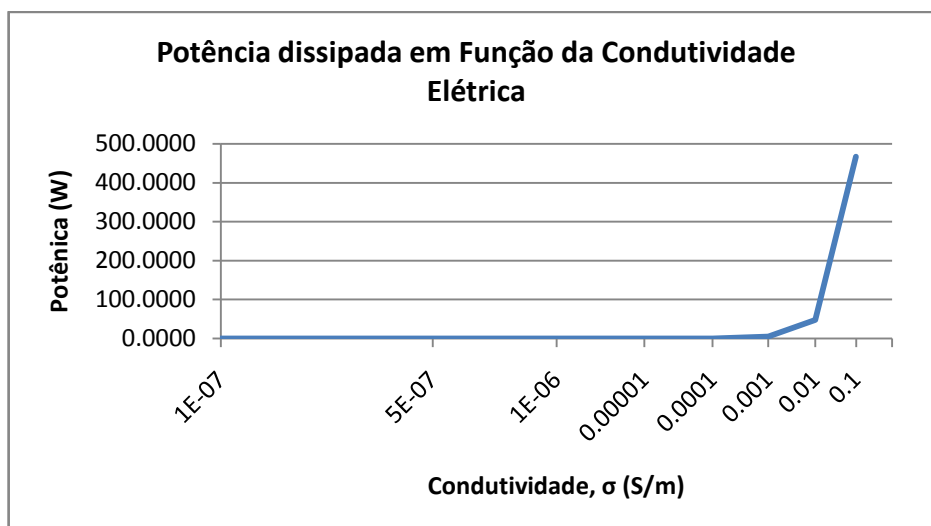


Gráfico 2: Potência dissipada em Função da Condutividade Elétrica
 Fonte: O autor

Com base na tabela 2 e gráfico 2, é possível buscar um raio adequado, uma concentração de ar/combustível, uma energia dissipada pela antena, bem como energia de ativação. O maior dos objetivos torna-se em encontrar um raio de semiesfera, com o qual pode-se ter valores próximos de potência (multiplicada pelo tempo de 1 segundo, o que resulta em energia) e a energia de ativação para a explosão de gasolina.

De acordo com o gráfico 1, a energia de ativação é menor quando o raio da semiesfera é menor. Da mesma forma, nas proximidades da antena a energia dissipada é mais intensa. Sendo assim, pode-se concluir que conforme se diminui o raio da esfera que contém o certo volume de gasolina, a energia necessária para dar início à combustão diminui, de tal modo que é possível encontrar uma solução real para a igualdade.

Após diversas simulações, buscando encontrar valores próximos nos dois programas, potência dissipada e energia de ativação, foram encontrados valores que satisfizeram a igualdade. Para tanto, é preciso considerar que o programa da energia que utiliza a condutividade elétrica, é de fato um programa que calcula potência elétrica. Considerou-se o valor de potência numericamente igual ao de energia dissipada, pelo fato de ser utilizado um período de tempo de 1 s, o qual se acreditou ser tempo suficiente para a emissão de ondas eletromagnéticas e início de uma explosão.

Foram aplicados no primeiro programa, os valores da condutividade elétrica da gasolina comum em estado gasoso, entre os valores de condutividade elétrica do álcool (composição de 25% na gasolina comum) de valor $500 \cdot 10^{-6}$ S/m e da gasolina pura (75% na composição da gasolina comum), a qual tem condutividade elétrica de $500 \cdot 10^{-12}$ S/m. Assim sendo, como a explosão ocorre nas proximidades da antena, pode-se considerar uma boa aproximação o uso de um raio da semiesfera de 0.05 m, respeitando a consideração *Near Field*.

A tabela 3 apresenta os dados aplicados no programa da energia necessária para início de combustão, enquanto a tabela 4 apresenta os dados aplicados no programa da energia de ativação do combustível.

Tabela 3: Resultados de energia necessária para o início da combustão

Fonte: Autor

Dados	Valores
Raio	0.05 m
Condutividade Elétrica	$500 \cdot 10^{-6}$ S/m
Corrente Elétrica	0.32 A com 10 graus
Divisões da Antena	40
Divisões do Volume	125000 (50 para cada eixo)
RESULTADO	151.00 J

Tabela 4: Resultados da energia de ativação do combustível

Fonte: Autor

Dados	Valores
Raio	0.05 m
Temperatura	27° C
Proporção Ar/Combustível	1.4%
RESULTADO	166.3 J

O valor do raio de 0,05 m está totalmente dentro do previsto, pois é a distância aproximada entre o aparelho celular e o início da combustão da gasolina do caso apresentado como justificativa. Vale ressaltar ainda que o tempo considerado foi de apenas 1 s, e, caso fosse um tempo maior, a energia dissipada pelo aparelho celular seria proporcionalmente maior. O efeito da explosão é do tipo cascata, iniciando-se de um ponto próximo ao aparelho e eclodindo na direção radial.

Como as energias dissipada e de ativação estão próximos a 150 J, é possível afirmar que existe a possibilidade de uma onda eletromagnética, emitida por um aparelho celular, causar a explosão de um combustível, neste caso a gasolina. É uma situação em que o acidente pode ocorrer por ser um momento crítico e potencialmente desfavorável ao usuário de celular.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos propostos, com o foco de desvendar se é possível ou não que haja a explosão de combustível provocada por ondas eletromagnéticas emitidas por aparelhos de telefonia celular, foi realizada uma simulação nos programas Matlab e Fortran, em que os resultados encontrados são as respostas das indagações iniciais deste trabalho.

Para tanto, foi necessária a realização de um estudo teórico preliminar envolvendo a matemática vetorial, o eletromagnetismo e a termodinâmica. Além disso, foram extraídas informações de jornais e revistas, as quais poderiam de alguma forma desvendar uma nova possibilidade de explosão de gasolina, pertinente ao estudo.

Entre todas as possibilidades analisadas, preliminarmente estavam o faiscamento no interior do aparelho, eletricidade estática, e o foco do estudo, que é a possível explosão de combustível por ondas eletromagnéticas. O faiscamento foi descartado logo de princípio, pelas razões de que o aparelho é hermeticamente fechado e isolado fisicamente do meio externo ao aparelho. A possibilidade de explosão por eletricidade estática não foi descartada, porém não foi interesse desse estudo e, portanto, foi deixada para um estudo mais específico no futuro.

Devido ao fato de não existir um consenso científico de que a utilização de um telefone celular possa ser considerada um fator de risco em locais com grande potencial explosivo, foi preciso buscar equações que fornecessem quantitativamente qual o valor da energia (potência em certo intervalo de tempo) dissipada por uma pequena antena.

Os aparelhos de telefonia celular informam que têm potência aproximada de 1,5 watts. De acordo com os cálculos e simulações, para ter essa potência, é preciso que haja a circulação de 0,32 ampères de corrente elétrica pela antena do aparelho.

Desse modo, aplicando essa corrente elétrica em uma antena monopolo de um quarto de comprimento de onda, é gerada uma potência muito próxima a 1,5 watts.

Foi preciso analisar, a partir de então, os valores da energia de ativação da gasolina. A energia de ativação depende de fatores como temperatura ambiente, concentração de ar/combustível da mistura, calor específico, massa molar. Principalmente, para este estudo, era necessária a condutividade elétrica do vapor de gasolina, para calcular a real energia dissipada nas proximidades do aparelho celular. Como não foi possível encontrar nas referências esse valor, foram feitas comparações com os dados da condutividade elétrica do álcool e da gasolina de aviação, as quais foram encontradas no estado líquido.

Através de gráficos e tabelas, foram aplicados valores de raio da semiesfera adotada como 0,05 m, que representa a energia dissipada no modo *Near Field*, uma condutividade elétrica de $500 \cdot 10^{-6}$ S/m, corrente elétrica de 0,32 ampères, defasada em +10 graus. A antena foi dividida em 40 partes, as quais foram integradas para 125000 partes de volume cada, resultando em 5000000 pontos calculados. A energia dissipada em 1 segundo, nessas circunstâncias, chegou a 151,0 joules.

Para o cálculo da energia de ativação, usou-se uma concentração de 1,4% de gasolina presente em oxigênio (mistura pobre), temperatura ambiente de 27° Célcius, em um raio de 0,05 metros. A energia de ativação necessária para a combustão calculada foi de 163,3 joules.

Devido à proximidade dos valores encontrados, é notável que, através do princípio da conservação da energia, é possível que a energia dissipada pela antena seja convertida para a energia de ativação necessária para causar a explosão da gasolina. Entretanto, é preciso observar que variáveis importantes, como a condutividade elétrica, tempo de dissipação de energia, concentração e temperatura, por exemplo, foram aproximados.

Além disso, é possível que uma combinação de outros fatores potencializem ainda mais a explosão, criando um ambiente totalmente favorável para a combustão da gasolina.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS

ANP. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/>> Acessado em 04 Ago. 2013

ASSUMPCÃO, J.P.A., **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**, Editora da UFSC, Florianópolis, Brasil, 2008.

BR Disponível em:

<<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/52cb170043a79d87baa2bfec2d0136c/fispq-auto-gasolina-comum.pdf?MOD=AJPERES/>> Acessado em 25 jan. 2014

BOLES, Michael A. **Termodinâmica**, Editora AMGH, Porto Alegre, Brasil, 2013.

CALLEN, Herbert B., **Termodinâmica**, Editora CUCEI, Madrid, Espanha, 2008.

CBMERJ, Disponível em:

< <http://www.cbmerj.rj.gov.br/>> Acessado em 20 jan. 2014

CELULAR CAUSA EXPLOSÃO. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=gU6BLDEcAKM>> Acesso em: 04 Ago. 2013.

CETESB,2014, Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/>> Acessado em 25 jan. 2014

CECIERJ, Disponível em:

<<http://cederj.edu.br/fundacao/>> Acessado em 28 fev. 2014

CRUZ, Maria Janete Fachine, **DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E PREDIÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR DE GASOLINAS COM ADITIVOS OXIGENADOS**, Recife, Pernambuco, Brasil, 2003.

DARTORA Disponível em:

<http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/Ondas_Eletromagneticas.pdf> Acessado em 15 jan. 2014

FERNANDES Disponível em:

<http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2012/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Gabriel%20Werpel%20Fernandes.pdf> Acessado em 28 de julho de 2014

FURTADO Disponível em:

<<http://professordiegof.webnode.com.br/telecomunica%C3%A7%C3%B5es/antena-dipolo/>> Acessado em 15 jan. 2014

GUIDORIZZI, Luiz Hamilton, **UM CURSO DE CÁLCULO**, Editora LTC, São Paulo 1984.

HAYT, Willian H. Jr, **Eletromagnetismo**, Editora LTC, Porto Alegre 2003

MACNAMARA, Thereza, **Introduction to Antenna Placement and Installation**, Wiley, 2003.

NUSSENZVEIG, Moysés, **FÍSICA GERAL**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2008

FABRICANTE. Disponível em:

<<http://www.fabricante.com/in-en/support/product/modelofabricante/>> Acesso em: 04 Fevereiro. 2013.

PIRES, Marcelo Alberto de Faria - Disponível em:

<<http://www.ele.ita.br/~fpires/AULA%25207.ppt+&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>> Acessado em 15 jan. 2014

RUSSELL, John B., **QUÍMICA GERAL**, Editora Makron Books, São Paulo, 2010

SOLER Disponível em:

<http://www.solerpalau.pt/formacion_01_11.html#4> Acessado em 25 jan. 2014

STEINBRUCH, Alfredo, **GEOMETRIA ANALÍTICA**, Editora Pearson, São Paulo 1988

STEWART, James, **CÁLCULO**, Editora Makron Books, São Paulo, 2006.

TEXAS, Disponível em:

<<http://www.ti.com/>> Acessado em 25 jan. 2014

CAPÍTULO 8 - ANEXOS

ANEXOS A - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A.1 ANÁLISE VETORIAL

É um assunto matemático fundamental para o entendimento, dedução e descrição dos conceitos físicos. As demonstrações neste trabalho estão indicadas e na maioria das vezes não serão rigorosamente expostas.

A.1.1 Produto Escalar

Chama-se produto escalar (ou produto interno) de dois vetores $\vec{u} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$ e $\vec{v} = x_2\vec{i} + y_2\vec{j} + z_2\vec{k}$, e se representa por $\vec{u} \cdot \vec{v}$ ou $\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle$, ao número real (STEINBRUCH, 1988):

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2. \quad (\text{A.1.1.1})$$

Poderá ainda ser calculado em função dos módulos e o ângulo θ formado entre os vetores:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cos\theta \quad (\text{A.1.1.2})$$

Uma de suas mais importantes propriedades é:

$$\vec{u} \cdot \vec{u} = u^2 = |\vec{u}|^2. \quad (\text{A.1.1.3})$$

A.1.2 Produto Vetorial

Dados os vetores $\vec{u} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$ e $\vec{v} = x_2\vec{i} + y_2\vec{j} + z_2\vec{k}$, tomados nessa ordem, chama-se produto vetorial (ou produto externo) dos vetores \vec{u} e \vec{v} , e se representa por $\vec{u} \times \vec{v}$ ou $\vec{u} \wedge \vec{v}$, ao vetor (STEINBRUCH, 1988):

$$\vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} \quad (\text{A.1.2.1})$$

A direção do produto vetorial será perpendicular ao plano dos vetores envolvidos e o sentido obedecerá à regra da mão direita. Desse modo, o produto vetorial pode ser escrito em função de seus módulos e ângulo θ formado entre os vetores:

$$\vec{u} \times \vec{v} = \vec{a}_n |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \text{sen} \theta \quad (\text{A.1.2.2})$$

onde \vec{a}_n representa o vetor unitário normal ao plano que passa por \vec{u} e \vec{v} .

Observa-se nessa relação que se tem inversão de sentido se inverter-se a ordem do produto vetorial, devido ao seno ser uma função ímpar e os ângulos trocarem de sinal na relação de \vec{u} para \vec{v} e \vec{v} para \vec{u} . Assim:

$$\vec{u} \times \vec{v} = \vec{a}_n |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \text{sen} \theta = -\vec{a}_n |\vec{v}| \cdot |\vec{u}| \text{sen}(-\theta) = -\vec{v} \times \vec{u} \quad (\text{A.1.2.3})$$

Diferentemente de um produto escalar, o produto vetorial de dois vetores unitários de mesma direção será nulo, enquanto o produto vetorial de dois vetores unitários de diferentes direções terá valor não nulo.

A.1.3 Sistema de Coordenadas Esféricas

Um sistema em coordenadas esféricas pode ser construído sobre os eixos cartesianos. A distância da origem até qualquer ponto será definido como raio, fazendo com que o conjunto de todos os pontos, tais que r é uma constante, seja uma esfera. O ângulo θ será definido entre o eixo z e a linha desenhada da origem ao ponto em questão. Percebe-se que quando θ é uma constante tem-se um cone, sendo esse sempre perpendicular nos pontos de interseção com a esfera. Essa interseção forma um círculo de raio $r \text{sen} \theta$.

A terceira coordenada ϕ é também um ângulo, formado entre o eixo x e a projeção de r no plano xy , tal que $z=0$ e a orientação seja de x para y . Quando ϕ é constante, tem-se um plano que passa pelo eixo z (HAYT, 2003).

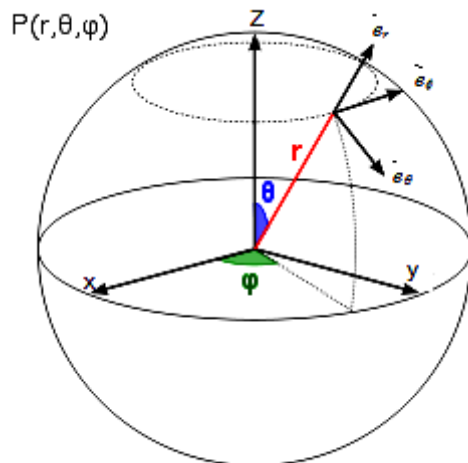


Figura 5: Sistema de Coordenadas Esféricas
Fonte: IF USP

Pode-se representar o sistema de coordenadas esféricas com o sistema de coordenadas retangulares. Observam-se os ângulos sendo formados entre x e a projeção de r sobre o plano Oxy , assim como a variação angular entre o vetor r e o eixo Oz . Desse modo pode-se concluir que:

$$x = r \operatorname{sen} \theta \cos \phi \quad (\text{A.1.3.1})$$

$$y = r \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi \quad (\text{A.1.3.2})$$

$$z = r \cos \theta \quad (\text{A.1.3.3})$$

Assim como:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{A.1.3.4})$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (\text{A.1.3.5})$$

$$\phi = \arctan \frac{y}{x}. \quad (\text{A.1.3.6})$$

O produto vetorial em coordenadas esféricas é uma das mais importantes operações utilizadas. Sejam os vetores

$$\vec{u} = u_r \vec{e}_r + u_\theta \vec{e}_\theta + u_\phi \vec{e}_\phi, \quad (\text{A.1.3.7})$$

e

$$\vec{v} = v_r \vec{e}_r + v_\theta \vec{e}_\theta + v_\phi \vec{e}_\phi. \quad (\text{A.1.3.8})$$

Seu produto vetorial será dado por:

$$\vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\theta & \vec{e}_\phi \\ u_r & u_\theta & u_\phi \\ v_r & v_\theta & v_\phi \end{vmatrix}. \quad (\text{A.1.3.9})$$

É preciso ainda definir os elementos infinitesimais de área e volume no sistema de coordenadas esféricas:

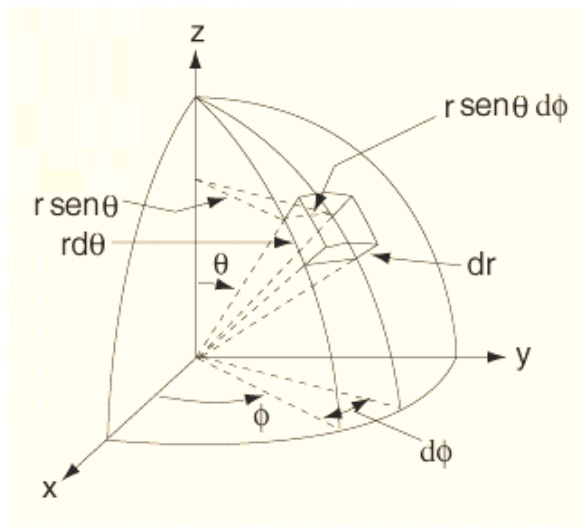


Figura 6: Elementos Diferenciais em Coordenadas Esféricas
Fonte: STEWART

A área infinitesimal será dada por:

$$dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{A.1.3.10})$$

O volume infinitesimal será dado por:

$$dV = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr \quad (\text{A.1.3.11})$$

A.1.4 Operador Del

O Operador Del foi introduzido por Rowan Hamilton no cálculo para facilitar a representação das derivadas parciais direcionais. Essas tornariam as escritas de expressões longas e repetitivas. É utilizado o símbolo nabla (∇) para representar o operador (STEWART, 2006).

Desse modo, no sistema de coordenadas ortogonais cartesiano será definido como:

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}. \quad (\text{A.1.4.1})$$

A.1.5 Gradiente de um Campo Escalar

O gradiente de uma função indicará o sentido e a direção de maior taxa de crescimento de uma quantidade por unidade de espaço (STEWART, 2006). Seja a função escalar $f(x, y, z)$. O gradiente de um campo escalar e será dado, em coordenadas retangulares, por:

$$\text{grad}(f) = \nabla \cdot f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k}. \quad (\text{A.1.5.1})$$

A.1.6 Rotacional

Seja $\vec{F}(x, y, z) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k}$ um campo vetorial tridimensional e as derivadas parciais de P, Q e R existindo. O rotacional de \vec{F} será um campo vetorial tridimensional definido como:

$$\text{rot}\vec{F} = \nabla \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} \quad (\text{A.1.6})$$

Um teorema muito importante é a relação de rotacional nulo: sempre que o rotacional de um campo vetorial for nulo, esse será dito conservativo (GUIDORIZZI, 1984).

A.1.7 Divergente

Seja $\vec{F}(x, y, z) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k}$ um campo vetorial tridimensional e as derivadas parciais de P, Q e R existindo. O seu divergente será um escalar, definido como:

$$\text{div}\vec{F} = \nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \quad (\text{A.1.7.1})$$

Sempre que um campo vetorial tiver suas componentes com derivadas parciais de segunda ordem contínuas, pode-se dizer que o divergente do rotacional desse campo será nulo (GUIDORIZZI, 1984), ou:

$$\text{div}(\text{rot}\vec{F}) = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{F}) = 0 \quad (\text{A.1.7.2})$$

A.1.8 Teorema de Stokes

O Teorema de Stokes relaciona uma integral de superfície sobre uma superfície S, com uma integral ao redor da curva fronteira de S, que é uma curva no espaço (STEWART, 2006). Seja S uma superfície orientada, lisa por trechos, cuja fronteira é formada por uma curva C simples, fechada, lisa por trechos, com

orientação positiva. Seja \vec{F} um campo vetorial cujos componentes têm derivadas parciais contínuas na região aberta tridimensional que contém S. Então:

$$\int_C \vec{F} \cdot d\vec{r} = \iint_S (\text{rot} \vec{F}) \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.1.8})$$

A.1.9 Teorema da divergência

Seja E uma região sólida simples e seja S a superfície de fronteira de E, orientada positivamente para fora. Seja \vec{F} um campo vetorial cujas funções componentes têm derivadas parciais contínuas em uma região aberta que contenha E (STEWART, 2006). Então:

$$\iint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = \iiint_E (\text{div} \vec{F}) \cdot dV \quad (\text{A.1.8})$$

A.2 AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

James Clark Maxwell nasceu na Escócia em 1831, formou-se na Universidade de Cambridge, onde teve uma excelente formação matemática. Após leituras das “Pesquisas Experimentais sobre Eletricidade” de Faraday, ele procurou dar a formulação matemática às ideias de Faraday e a todos os demais.

Os fenômenos eletromagnéticos decorrem de um conjunto de equações básicas para o campo eletromagnético. Essas equações podem ser formuladas tanto em forma integral quanto em forma diferencial (ou local), usando dois resultados de análise vetorial da matemática básica, que são o teorema da divergência e o teorema do rotacional. Foi Maxwell quem formulou os resultados em termos dos operadores vetoriais *div* e *rot*, como conhecemos hoje (NUSSENZVEIG, 2008).

A.2.1 As grandezas físicas fundamentais do eletromagnetismo

a) O Campo Elétrico (\vec{E})

Uma carga ou um conjunto de cargas elétricas, sem movimento no espaço, tem a propriedade de criar, no volume que as envolve, uma grandeza chamada campo elétrico E , que é um campo de vetores. Sua unidade é volt por metro (ASSUMPÇÃO, 2008).

b) Campo Magnético (\vec{H})

Uma carga (ou conjunto de cargas) em movimento, possuindo uma velocidade de deslocamento, forma um Campo Magnético ao redor de seu deslocamento, de acordo com a regra da mão direita (ASSUMPÇÃO, 2008).

Um conjunto de cargas em movimento é o que se chama de corrente elétrica, que é a responsável pela criação do Campo Magnético. A unidade de Campo Magnético é ampère por metro (ASSUMPÇÃO, 2008).

c) Indução Magnética (\vec{B}) e a Permeabilidade Magnética (μ)

Sendo B um campo vetorial, seu fluxo magnético ϕ através de uma superfície aberta S será:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.2.1.1})$$

A permeabilidade μ , de um meio, expressa intrinsecamente sua capacidade de se mostrar mais ou menos suscetível à passagem de fluxo magnético. A relação constitutiva será:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{A.2.1.2})$$

Quando maior a permeabilidade, maior será a indução e maior será o fluxo que poderá passar numa seção S . Desse modo, \vec{B} é chamado de indução por expressar a capacidade de induzir fluxo em um dado meio. As unidades de indução e fluxo são respectivamente tesla e weber (ASSUMPÇÃO, 2008).

d) A Indução Elétrica (\vec{D}) e a Permissividade Elétrica (ϵ)

Analogamente à Indução Magnética e a Permeabilidade Magnética, uma relação constitutiva é:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{A.2.1.3})$$

Uma das grandes diferenças é que diferentemente de μ , ε varia relativamente pouco. Outro fato está em ter-se o Campo Elétrico como mais interessante para o estudo, ao passo que em magnetismo a indução magnética assume o papel preponderante na análise do fenômeno. A unidade da permissividade é farad por metro e o da Indução Elétrica é coulomb por metro elevado ao quadrado (ASSUMPÇÃO, 2008).

e) A densidade superficial de corrente (\vec{J})

Seja um fio condutor retilíneo com seção S percorrido de forma uniforme por uma corrente I. A densidade superficial média de corrente atravessando a seção é dada por:

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{A.2.1.4})$$

dado em ampère por metro elevado ao quadrado. O vetor \vec{J} possui módulo J com uma direção e sentido indicados pela normal à área S de saída da corrente I (ASSUMPÇÃO, 2008). O Cálculo de J através de S fornece a corrente I da seguinte forma:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.2.1.5})$$

f) Densidade Volumétrica de Carga (ρ)

A densidade volumétrica de carga será dada pelo somatório de cargas sobre um volume V por essas ocupado. Sua unidade será o Coulomb por metro elevado ao cubo (ASSUMPÇÃO, 2008).

g) A Condutividade Elétrica (σ)

De um modo geral, em problemas de campo elétrico pode-se ter meios dielétricos (ou isolantes) e condutores. Os materiais isolantes são caracterizados por

seus valores de permissividade e rigidez dielétricas. Já os meios condutores são caracterizados por sua condutividade σ , que expressa o quão fácil ou difícil é a passagem de corrente elétrica pelo condutor, com unidade siemens por metro (ASSUMPÇÃO, 2008).

Sua equação, que é a Lei de Ohm na forma local, é dada por:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{A.2.1.6})$$

A.2.2 Lei de Gauss

É assim chamada por prestar homenagem ao matemático e físico alemão Carl Friedrich Gauss. Descreve a relação entre um campo elétrico e as cargas elétricas geradoras desse campo. As linhas de campo elétrico começam nas cargas positivas e terminam nas cargas negativas. Considerando uma superfície fechada, é coerente afirmar que se obterá a quantidade total de cargas inclusas se fossem integralizadas as linhas de campo, para um único meio, por exemplo no ar (DARTORA, 2014).

A equação será representada por:

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{A.2.2})$$

A equação, na forma local, mostra que o vetor \vec{D} é divergente e que seu fluxo é não conservativo, pois seu divergente representa a razão entre a densidade volumétrica da carga ρ e a permissividade elétrica ϵ . Desse modo, é possível conceber volumes no espaço onde há uma variação entre os fluxos elétricos que entram e que saem desses (ASSUMPÇÃO, 2008).

A.2.3 Lei de Gauss para o Magnetismo

Não existem cargas ou monopolos magnéticos análogos similares às cargas elétricas. O Campo magnético é gerado por um dipolo magnético, que são

representados linhas de campo fechadas. Essas lembram cargas magnéticas “positivas” e “negativas” inseparáveis, não havendo cargas magnéticas isoladas (DARTORA, 2014).

Em relação a linhas de campo, a equação afirma que as linhas de campo magnético nunca começam ou terminam, mas sim que circulam. Desse modo, o fluxo magnético através de qualquer superfície gaussiana (superfície geométrica tridimensional) é nulo. A equação na forma local será:

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{A.2.3})$$

onde \vec{B} representa o vetor Indução Magnética. O fluxo magnético é chamado conservativo, ou seja, o fluxo magnético que entra em certo volume é igual ao fluxo magnético que sai desse mesmo volume (ASSUMPÇÃO, 2008).

A.2.4 Lei de Faraday-Neumann-Lenz

Buscando uma simetria na natureza, e sabendo-se que uma corrente elétrica é capaz de produzir campo magnético, por volta de 1820, os cientistas verificavam se uma corrente elétrica seria capaz de produzir um campo magnético. Porém, se perguntavam sobre a possibilidade de haver um campo magnético gerando fenômenos elétricos. Assim, Michael Faraday e Joseph Henry responderam essa pergunta, separadamente: em um campo magnético constante (invariável no tempo) não é possível induzir uma corrente elétrica num circuito próximo.

Aperfeiçoando seus estudos, em 1831 Faraday percebeu que com um campo magnético variável (variando em função do tempo), surgia uma força eletromotriz induzida no mesmo circuito observado anteriormente. Além disso, outro estudo, de Hans Christian Oersted mostrava que surgia uma corrente elétrica, medida por um galvanômetro, quando um ímã era aproximado ou afastado de tal circuito (fazendo existir a variação do fluxo magnético).

Assim, Faraday percebeu a existência de uma corrente, de um modo teórico. Apenas mais tarde que Franz Ernst Neumann a equacionou matematicamente, do

mesmo modo que Faraday a idealizou. Mas foi preciso o estudo de Heinrich Friedrich Emil Lenz para deduzir que o sentido da corrente dependia de algum novo fato que foi desprezado por Faraday. Assim, existindo variação temporal de fluxo magnético, surgirá uma força eletromotriz induzida (e_{ind}), ddp ou tensão. A fórmula que expressa tal fenômeno será:

$$e_{ind} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (\text{A.2.4.1})$$

sendo o sinal negativo de Lenz representando que a corrente criada pelo campo magnético opõe-se à variação do campo magnético que a produziu. O \vec{E} é o Campo Elétrico induzido e ϕ_m representa o fluxo magnético (NUSSENZVEIG, 2008).

A variação temporal de fluxo magnético \vec{B} induz um campo elétrico \vec{E} . Sabe-se que da matemática básica, que o Campo Vetorial obtido por um gradiente de um escalar tem integral de circulação total nula, ou seja, o campo é não rotacional, ou ainda o campo é um campo divergente. Dessa forma:

$$\oint \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = \oint (\text{grad}\phi_m) \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\text{A.2.4.2})$$

sendo \vec{E}_e e campo induzido. Com base nisso, não é possível representar o campo elétrico como um gradiente de potencial escalar do fluxo, pois a observação sugere que a primeira parte da integral seja não nula. Escrevendo a equação em função dos termos do campo magnético:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.2.4.3})$$

Utilizando o teorema de Stokes à integral de linha fechada, pode-se escrever:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.2.4.4})$$

Como as superfícies serão perfeitamente gerais e podem ser escolhidas como diferenciais, implicam que um campo magnético variável no tempo induz um campo elétrico (ASSUMPÇÃO, 2008). Em termos de equação:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.2.4.5})$$

A.2.5 Lei de Ampère-Maxwell

Por volta de 1819, Hans Christian Oersted estudava a ação de uma corrente elétrica sobre um ímã, com uma agulha imantada perpendicular ao fio retilíneo por onde passava a corrente. Não era observado nenhum efeito desse modo, porém, quando a agulha era colocada paralelamente ao fio, sofria certa deflexão, orientando-se perpendicularmente ao sentido da corrente. Essa conclusão provava que uma corrente produz então, um campo magnético (DARTORA, 2014).

Esses resultados foram utilizados por André Marie Ampère para formular a bem conhecida Lei de Ampère. “As linhas de campo magnético em um fio condutor retilíneo são círculos em planos perpendiculares ao fio, obedecendo à regra da mão direita”.

Para campos estacionários, tinha-se a forma pontual:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{A.2.5.1})$$

Sabe-se que o divergente do rotacional é identicamente nulo. Desse modo, tomando a divergência em ambos os lados da equação, vem:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{A.2.5.2})$$

Esse resultado só é verídico quando não houver variação de densidade volumétrica de cargas. Para isso, Maxwell observou que as cargas de polarização num dielétrico produzem um campo elétrico, a *corrente de polarização* deve produzir um campo magnético (NUSSENZVEIG, 2008). Introduzindo o termo na equação e refazendo os devidos cálculos tem-se:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{A.2.5.3})$$

Como equação secundária tem-se que $\rho = \nabla \cdot \vec{D}$. Então:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \nabla \cdot \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2.5.4})$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \vec{J} + \nabla \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2.5.5})$$

Eliminado o teorema da divergência de ambos os lados vem:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2.5.6})$$

Essa equação é válida da mesma forma como são as leis experimentais e equações obtidas a partir dessa (DARTORA, 2014). A Lei é capaz de expressar a maneira com a qual o campo magnético pode ser criado a partir da corrente de condução, ligada a \vec{J} , e da variação temporal de indução elétrica, ligada a $\partial \vec{D} / \partial t$ (ASSUMPÇÃO, 2008).

A.3 O TEOREMA DE POYNTING

É utilizado para calcular a potência de uma onda plana uniforme. Foi postulado em 1884 pelo físico inglês John Henry Poynting (HAYT, 2003).

Com base na equação (A.2.5.6)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2.5.6})$$

Aplica-se em ambos os lados o produto escalar por \vec{E} :

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} . \quad (\text{A.3.1})$$

Aplica-se a identidade vetorial:

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) . \quad (\text{A.3.2})$$

Desse modo:

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} . \quad (\text{A.3.3})$$

A equação (A.2.4.5) pode ser substituída na (A.3.3). Desse modo:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.2.4.5})$$

$$\vec{H} \cdot \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.3.4})$$

Reorganizando:

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.3.5})$$

Utilizando as relações constitutivas teremos:

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} . \quad (\text{A.3.6})$$

De acordo com a regra da derivada do produto de funções:

$$\frac{\partial \varepsilon \vec{E}^2}{\partial t^2} = \frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{E} + \varepsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} . \quad (\text{A.3.7})$$

Isolando o termo conveniente vem:

$$\epsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} \right) \quad (\text{A.3.8})$$

Similarmente, tem-se:

$$\mu \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) \quad (\text{A.3.9})$$

Substituindo os termos em (A.3.6)

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) \quad (\text{A.3.10})$$

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) \quad (\text{A.3.11})$$

Aplicando a integral através do volume tem-se:

$$-\int_{Vol} \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) dV = \int_{Vol} \vec{E} \cdot \vec{J} dV + \int_{Vol} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) dV \quad (\text{A.3.12})$$

Fazendo a substituição do teorema da divergência obtém:

$$-\oint_S \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) d\vec{S} = \int_{Vol} \vec{E} \cdot \vec{J} dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) dV. \quad (\text{A.3.13})$$

Analisando cada parte da equação pode-se concluir que o primeiro membro do lado direito da equação será a potência ôhmica (elétrica) total dissipada dentro do volume, desde que não existam fontes dentro do mesmo. Porém, se existir, o resultado será positivo se a potência estiver sendo entregue para a fonte e negativa, caso estiver sendo entregue pela fonte (HAYT, 2003).

O segundo termo do lado direito refere-se à energia total armazenada pelos campos elétrico e magnético, contendo as derivadas parciais em relação ao tempo sendo taxas de acréscimo de energia armazenada dentro do dado volume.

Com base nos dois raciocínios, a soma do lado direito refere-se à energia que flui para dentro desse volume. Desse modo, o termo do lado esquerdo refere-se à energia que flui para fora do mesmo volume. Refere-se à integral sobre a superfície fechada que envolve o volume.

O termo $\vec{E} \times \vec{B}$ é o produto vetorial conhecido como Vetor de Poynting, que é interpretado como uma densidade de potência instantânea, medida em watts por metro elevado ao quadrado (W/m^2). A direção do Vetor de Poynting indica a direção do fluxo de potência instantânea em um ponto.

Sabe-se que em um produto vetorial, o vetor resultante será perpendicular aos dois vetores multiplicados. Desse modo, tendo campo elétrico no eixo x e campo magnético no eixo y, o Vetor de Poynting está na direção do eixo z (HAYT, 2003).

A.4 POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO

É extremamente útil no estudo da irradiação de antenas, de aberturas e fuga de irradiação de linhas de transmissão, de guias de onda e de fornos microondas. O Potencial magnético vetorial pode ser usado em regiões onde a densidade de corrente é zero ou diferente de zero, além do caso variante no tempo (HAYT, 2003).

Seja a equação (A.2.3):

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{A.2.3})$$

Como resultado observa-se que o divergente da indução magnética é nulo. De acordo com as identidades matemáticas, o divergente de um rotacional é sempre nulo. Portanto, se o vetor \vec{B} é um rotacional de um vetor \vec{A} , esse será o Potencial Magnético Vetorial (HAYT, 2003).

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (\text{A.4.1})$$

Aplicando as relações constitutivas:

$$\mu \vec{H} = \nabla \times \vec{A}. \quad (\text{A.4.2})$$

Aplicando o rotacional em ambos os lados da expressão vem:

$$\nabla \times \mu \vec{H} = \nabla \times \nabla \times \vec{A}. \quad (\text{A.4.3})$$

A expressão da direita deve ser substituída uma das identidades matemáticas:

$$\mu (\nabla \times \vec{H}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \cdot \vec{A} \quad (\text{A.4.4})$$

Agora, utilizando a equação (A.2.4.5)

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.2.4.5})$$

e aplicando em (A.4.1) vem que:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial (\text{rot} \vec{A})}{\partial t} \quad (\text{A.4.5})$$

Então:

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{A.4.6})$$

Aplicando a identidade matemática que mostra que o rotacional de gradiente é sempre nulo, vem:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} \phi \quad (\text{A.4.7})$$

onde ϕ é um potencial escalar. Utilizando a lei de Biot-Savart, pode-se obter através de elementos diferenciais, com os termos de (A.4.4) e (A.4.7) a expressão do Potencial Magnético Vetorial:

$$\vec{A} = \oint \frac{\mu_0 I dL}{4\pi R} \vec{a}_n \quad (\text{A.4.8})$$

A equação significa que uma corrente contínua I flui ao longo de um condutor filamental do qual qualquer comprimento diferencial dL está distante R do ponto no qual \vec{A} deva ser encontrado (HAYT, 2003).

A.5 A PENETRAÇÃO DE CAMPOS EM CONDUTORES

A penetração de campos em meios condutores, ferromagnéticos ou não, é um problema que pode ser muito complexo dependendo da geometria analisada (ASSUMPÇÃO, 2008). A partir das equações de Maxwell encontra-se a profundidade de penetração δ em um meio condutor, definida como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_o \sigma \omega}} \quad (\text{A.5.1})$$

em que ω é a frequência da pulsação do campo indutor externo, definida como $\omega = 2\pi f$ e σ é a condutividade elétrica do meio.

Para tal campo elétrico \vec{E} tem-se:

$$E = E_o e^{-z\sqrt{\pi f \sigma \mu_o}} \cos(2\pi - z\sqrt{\pi f \sigma \mu_o}) \quad (\text{A.5.2})$$

ANEXOS B – PROGRAMAS

B.1 PROGRAMA DA ENERGIA MÁXIMA DISSIPADA (EM FORTRAN)

program campoeletrico

C Declaração de Variáveis

complex*16 i,Er,cc,la,la2, Hphi, Etet,conjHphi

double precision r,bo,f,tet,dl,c,lamb,aa,bb,dd,pi,no,angEr

double precision la1,angla,lar,laim,eo,uo,Erabs,Etetabs,h

double precision Err,Erimag,difer,zi,xp,yp,zp,za,rz,costet

double precision tetv,fiv,rv,drv,dfiv,dtetv,yi,dA

double precision tetav,phiv,rav,enerEr,enerEt,energia,dv,vol,Area

double precision poynting, vpoynting, vpt, pt

integer NdivA,NdivV,p

C Valores das Constantes

f=1800

f=f*1d6

eo=8.854d-12

pi= 3.14159265358979323846d0

uo=4*pi*1d-7

c=1/((eo*uo)**0.5)

C Comprimento de Onda

lamb=c/f

C Tamanho da Antena

h=lamb/4d0

C Entrada de valores das variáveis

write(*,*)'Entre com o raio da esfera'

read(*,*)rv

write(*,*)'Entre com a corrente e angulo na antena'

read(*,*)la1, angla

```
write(*,*)'Numero de divisões da antena'
```

```
read(*,*)NdivA
```

C Variação angular da Semiesfera

```
tetv=180
```

```
fiv=180
```

C Entrada do número de divisões desejada

```
write(*,*)'Entre com o numero de divisões do volume'
```

```
read(*,*)NdivV
```

```
i=(0d0,1d0)
```

C Conversão grau-radianos

```
angla=angla*pi/180
```

```
tetv=pi/180*tetv
```

```
fiv=pi/180*fiv
```

C Diferenciais numéricos

```
dl=h/NdivA
```

```
drv=rv/NdivV
```

```
dtetv=tetv/NdivV
```

```
dfiv=fiv/NdivV
```

C Correntes Reais e Complexas

```
lar=la1*cos(angla)
```

```
laim=la1*sin(angla)
```

```
la=cplx(lar,laim)
```

C Constantes

```
no=120*pi
```

```
bo=2*pi/Lamb
```

C Condições iniciais de iteração

```
za=0d0
```

```
enerEr=0d0
```

```
enerEt=0d0
```

p=0d0

vpt=0d0

pt=0d0

C Iteração

do i1=1,NdivA

C Consideração inicial e Incrementos de za

rav=0d0

za=za+dl

vol=0d0

do i2=1, NdivV

rav=rav+drv

Area=0d0

vpoynting=0d0

tetav=0d0

do i3=1,NdivV

phiv=0

do i4=1,NdivV

C Conversão de Coordenadas

xp=rav*sin(tetav)*cos(phiv)

yp=rav*sin(tetav)*sin(phiv)

zp=rav*cos(tetav)

r=sqrt(xp**2+yp**2+(zp-za)**2)

tet=acos((zp-za)/r)

la2=la*sin(bo*(h-za))

C Quebra de equação em partes parciais

aa=1/(bo*r)**2

bb=1/(bo*r)**3

cc=exp(-i*bo*r)

$$dd=1/(bo*r)$$

C Expressões dos Campos Elétrico e Magnético

$$Er=2*la2*dl/(4*pi)*no*bo**2*cos(tet)*(aa-i*bb)*cc$$

$$Etet=la2*dl/(4*pi)*no*bo**2*sin(tet)*(i*dd+aa-i*bb)*cc$$

$$Hphi=la2*dl/(4*pi)*bo**2*sin(tet)*(i*dd+aa)*cc$$

C Diferenciais de volume e área

$$dv=(rav**2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv*drv$$

$$dA=(rav**2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv$$

C Somatórias dos infinitesimais

$$\text{conjHphi}=\text{CONJG}(\text{Hphi})$$

$$\text{vpoynting}=\text{vpoynting}+\text{Etet}*\text{conjHphi}*dA$$

$$\text{poynting}=40*pi**2*(\text{abs}(la2)*dl/lamb)**2$$

C Incremento de volume , área e angular

$$\text{vol}=\text{vol}+dv$$

$$\text{Area}=\text{Area}+dA$$

$$\text{phiv}=\text{phiv}+dfiv$$

end do

$$\text{tetav}=\text{tetav}+dtetv$$

end do

C Somatório final do Incremento

$$\text{vpt} = \text{vpt} + \text{vpoynting}$$

$$\text{pt} = \text{pt} + \text{poynting}$$

end do

end do

$$\text{enerEr}=\text{eo}*\text{enerEr}/2d0$$

```
enerEt=eo*enerEt/2d0  
energia=enerEr+enerEt  
write(*,*)'Pot^ncia Calculada=',vpt  
write(*,*)'Pot^ncia Aproximada=',pt  
write(*,*)'Area=',Area  
write(*,*)'volume=',vol  
read(*,*)  
stop  
end
```

B.2 PROGRAMA DA ENERGIA NECESSÁRIA PARA COMBUSTÃO (EM FORTRAN)

program campoeletrico

C Declaração das Variáveis

*complex*16 i,Er,cc,la,la2, Hphi, Etet,conjHphi*
double precision r,bo,f,tet,dl,c,lamb,aa,bb,dd,pi,no,angEr
double precision la1,angla,lar,laim,eo,uo,Erabs,Etetabs,h
double precision Err,Erimag,difer,zi,xp,yp,zp,za,rz,costet
double precision tetv,fiv,rv,drv,dfiv,dtetv,yi,dA
double precision CampoE, CampoH, energia1
double precision tetav,phiv,rav,enerEr,enerEt,energia,dv,vol,Area
double precision poynting, vpoynting, vpt, pt, cond
integer NdivA,NdivV,p

C Valores de constantes

f=1800
*f=f*1d6*
eo=8.854d-12
pi= 3.14159265358979323846d0
*uo=4*pi*1d-7*
*c=1/((eo*uo)**0.5)*

C Comprimento de onda e da antena

lamb=c/f
h=lamb/4d0

C Entrada de valores

write(,*)' Entre com o raio da esfera'*
read(,*)rv*
write(,*)' Entre com a condutividade em S/m'*
read(,*)cond*

write(,*)'Entre com a corrente e angulo na antena'*

read(,*)Ia1, angla*

write(,*)'Numero de divisões da antena'*

read(,*)NdivA*

C Varrimento angular da esfera

tetv=180

fiv=180

write(,*)'Entre com o numero de divisoes do volume'*

read(,*)NdivV*

i=(0d0,1d0)

C Conversão graus-radianos

*angla=angla*pi/180*

*tetv=pi/180*tetv*

*fiv=pi/180*fiv*

C Valores infinitesimais

dl=h/NdivA

drv=r/NdivV

dtetv=tetv/NdivV

dfiv=fiv/NdivV

C Correntes reais e complexas

*Iar=Ia1*cos(angla)*

*Iaim=Ia1*sin(angla)*

Ia=cplx(Iar,Iaim)

*no=120*pi*

*bo=2*pi/Lamb*

C Considerações iniciais

za=0d0

enerEr=0d0

enerEt=0d0

energia=0d0

C *Iteração*

do i1=1,NdivA

rav=0d0

za=za+dl

vol=0d0

energia1=0d0

do i2=1, NdivV

rav=rav+drv

tetav=0d0

do i3=1,NdivV

phiv=0

do i4=1,NdivV

C *Conversão de Coordenadas*

*xp=rav*sin(tetav)*cos(phiv)*

*yp=rav*sin(tetav)*sin(phiv)*

*zp=rav*cos(tetav)*

*r=sqrt(xp**2+yp**2+(zp-za)**2)*

tet=acos((zp-za)/r)

*la2=la*sin(bo*(h-za))*

C *Quebras parciais da equação*

*aa=1/(bo*r)**2*

*bb=1/(bo*r)**3*

*cc=exp(-i*bo*r)*

*dd=1/(bo*r)*

*ee=exp(-r*sqrt(pi*f*cond*uo))*cos(2*pi-r*sqrt(pi*f*cond*uo))*

C *Expressões do campo elétrico*

*Er=ee*2*la2*dl/(4*pi)*no*bo**2*cos(tet)*(aa-i*bb)*cc*

*Etet=ee*la2*dl/(4*pi)*no*bo**2*sin(tet)*(i*dd+aa-i*bb)*cc*

```

C    Diferencial do Volume e Cálculo de Campo
      dv=(rav**2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv*drv
      CampoE=sqrt(REAL(Er)**2+REAL(Etet)**2)
      energia1=energia1+(cond*CampoE**2)*dv

      vol=vol+dv
      phiv=phiv+dfiv
      end do

      tetav=tetav+dtetv
      end do

      end do
      energia=energia+energia1
      end do

      write(*,*)'volume=',vol
      write(*,*)'Potência Dissipada=',energia
      read(*,*)
      stop
      end

```

B.3 PROGRAMA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO COMBUSTÍVEL (EM FORTRAN)

C Declaração de Variáveis

```
double precision t0, raio, con, R, ros, Mgas, Moxi, csgas , energia
double precision csox, vol, massa_gasolina, massa_oxigenio, pi
```

C Dados de entrada

```
write (*,*) 'Digite o raio da esfera, em metros:'
read (*,*) raio

write (*,*) 'Digite a proporção de ar/gasolina ( Entre 1.4 e 7.5%): '
read (*,*) con

write (*,*) 'Temperatura inicial em °C: '
read (*,*) to
```

C Expressões e constantes

```
con = con/100

to = to+273.15

R = 0.0224/273.15

ros = 1d0/R

Mgas = 42

Moxi = 32

csgas = 2.21

csoxi = 1.6

pi= 3.1416

vol = (2*pi*raio**3)/3
```

C Fórmulas de massa e energia de ativação

```
massa_gasolina = (vol*con*Mgas*csgas)/(R*to)
massa_oxigenio = (vol*(1-con)*Moxi*csoxi)/(R*to)
energia = (massa_gasolina+massa_oxigenio)*(588.15-to)
```

```
write(*,*)'O volume da semi esfera , ',vol
write(*,*)'A massa da gasolina , de ',massa_gasolina
write(*,*)'A massa do oxigênio , de ',massa_oxigenio
write(*,*)'A Energia de Ativação , de =',energia
read(*,*)
stop
end
```


B.4 PROGRAMA DA ENERGIA MÁXIMA DISSIPADA (EM MATLAB)

```

f=1800*10^6;
eo=8.854d-12;
uo=4*pi*10^7;
c=1/((eo*uo)^0.5);
lamb=c/f;
h=lamb/4;
rv=input('Digite Raio da Esfera: ');
la1=input('Entre com a corrente da antena: ');
angla=input('Entre com o angulo da corrente da antena: ');
NdivA=input('Qual o número de divisões da Antena? ');
NdivV=input('Qual o número de divisões do Volume? ');
angla=angla*pi/180;
tetv=pi;
fiv=pi;
dl=h/NdivA;
drv=rv/NdivV;
dtetv=tetv/NdivV;
dfiv=fiv/NdivV;
lar=la1*cos(angla);
laim=la1*sin(angla);
la=lar+laim*i;
no=120*pi;
bo=2*pi/lamb;
za=0;
enerEr=0;
enerEt=0;
p=0;

```

```

vpt=0;
pt=0;

for i1=1 : NdivA
rav=0;
za=za+dl;
vol=0;
  for i2=1 : NdivV
rav=rav+drv;
Area=0;
vpoynting=0;
tetav=0;
  for i3=1 : NdivV
phiv=0;
  for i4=1 : NdivV
xp=rav*sin(tetav)*cos(phiv);
yp=rav*sin(tetav)*sin(phiv);
zp=rav*cos(tetav);
r=sqrt(xp^2+yp^2+(zp-za)^2);
tet=acos((zp-za)/r);
la2=la*sin(bo*(h-za));
aa=1/(bo*r)^2;
bb=1/(bo*r)^3;
cc=exp(-i*bo*r);
dd=1/(bo*r);

Er=2*la2*dl/(4*pi)*no*bo^2*cos(tet)*(aa-i*bb)*cc;
Etet=la2*dl/(4*pi)*no*bo^2*sin(tet)*(i*dd+aa-i*bb)*cc;
Hphi=la2*dl/(4*pi)*bo^2*sin(tet)*(i*dd+aa)*cc;

```

```

dv=(rav^2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv*drv;
dA=(rav^2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv;

conjHphi=conj(Hphi);
vpoynting=vpoynting+Etet*conjHphi*dA;
poynting=40*(pi^2)*(abs(la2)*dl/lamb)^2;

vol=vol+dv;
Area=Area+dA;
phiv=phiv+dfiv;
end
tetav=tetav+dtetv;
end
vpt = vpt + vpoynting;
pt = pt+ poynting;
end
end

```

```

fprintf('\n Poymting Calculado %e ', vpt);
fprintf('\n Poyting Aproximado %e ', pt);
fprintf('\n Area %e ', Area);
fprintf('\n Volume %e ', vol);

```

B.5 PROGRAMA DA ENERGIA NECESSÁRIA PARA COMBUSTÃO (EM MATLAB)

```

f=1800*10^6;
eo=8.854d-12;
uo=4*pi*10^7;
c=1/((eo*uo)^0.5);
lamb=c/f;
h=lamb/4;
rv=input('Digite Raio da Esfera: ');
cond=input(' Entre com a condutividade em S/m: ');
la1=input('Entre com a corrente da antena: ');
angla=input('Entre com o angulo da corrente da antena: ');
NdivA=input('Qual o número de divisões da Antena? ');
NdivV=input('Qual o número de divisões do Volume? ');
angla=angla*pi/180;
tetv=pi;
fiv=pi;
dl=h/NdivA;
drv=rv/NdivV;
dtetv=tetv/NdivV;
dfiv=fiv/NdivV;
lar=la1*cos(angla);
laim=la1*sin(angla);
la=lar+laim*i;
no=120*pi;
bo=2*pi/lamb;
za=0;
enerEr=0;
enerEt=0;

```

```

p=0;
vpt=0;
pt=0;
energia=0;
energia1=0;
for i1=1 : NdivA
rav=0;
za=za+dl;
vol=0;
for i2=1 : NdivV
rav=rav+drv;
tetav=0;
for i3=1 : NdivV
phiv=0;
for i4=1 : NdivV
xp=rav*sin(tetav)*cos(phiv);
yp=rav*sin(tetav)*sin(phiv);
zp=rav*cos(tetav);
r=sqrt(xp^2+yp^2+(zp-za)^2);
tet=acos((zp-za)/r);
la2=la*sin(bo*(h-za));
aa=1/(bo*r)^2;
bb=1/(bo*r)^3;
cc=exp(-i*bo*r);
dd=1/(bo*r);
ee=exp(-r*(pi*f*cond*uo)^0.5)*cos(2*pi-r*(pi*f*cond*uo)^0.5);
Er=ee*2*la2*dl/(4*pi)*no*bo^2*cos(tet)*(aa-i*bb)*cc;
Etet=ee*la2*dl/(4*pi)*no*bo^2*sin(tet)*(i*dd+aa-i*bb)*cc;
dv=(rav^2)*sin(tetav)*dfiv*dtetv*drv;

```

```
CampoE=sqrt((real(Er))^2+(real(Etet))^2);
energia1=energia1+(cond*CampoE^2)*dv;
vol=vol+dv;
phiv=phiv+dfiv;
end
tetav=tetav+dtetv;
end
end
energia=energia+energia1;
end
fprintf('\n Potência Dissipada %e ', energia);
fprintf('\n Volume %e ', vol);
```

B.6 PROGRAMA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO (EM MATLAB)

```

%Cálculo da energia necessária para queima de certo volume de Gasolina
r = input('Digite o raio da esfera, em metros: ');
con = input('Digite a proporção ar/gasolina ( Valor entre 1.4 e 7.5%): ');
t0 = input('Temperatura inicial em °C: ');
con = con/100;
t0 = t0+273.15;
R = 0.0224/273.15;
ros = 1/R;      %densidade
Mgas = 42;      %massa molar
Moxi = 32;      %calor especifico J/g
csgas = 2.21;   %calor especifico J/g
csoxi = 1.6;    %calor especifico J/g
vol = (2*pi*r*r*r)/3; %volume de estudos
massa_gasolina = (ros*vol*con*Mgas*csgas)/t0; %massa
massa_oxigenio = (ros*vol*(1-con)*Moxi*csoxi)/t0; %massa
energia = (massa_gasolina+massa_oxigenio)*(588.15-t0);
disp(' ');
fprintf ('\n Volume da Semi Esfera= %d m³',vol);
fprintf ('\n Massa da gasolina = %d g',massa_gasolina);
fprintf ('\n Massa do oxigênio = %d g',massa_oxigenio);
fprintf ('\n A energia necessaria é de %d J',energia);

```