



DESENVOLVIMENTO DE FONTES DE PLASMA PARA CALIBRAÇÃO ESPECTROSCÓPICA DO MAGNETÓGRAFO DO PROJETO TELESCÓPIO SOLAR

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Rafael Faria Santana (Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de
Lorena, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: rafael.faria.santana@usp.br

Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira (COCEA/DIDGE, Orientador)
E-mail: luis.vieira@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Renato Sérgio Dallaqua (LAP/INPE)
Dra. Flavia Reis Cardoso (EEL/USP)

Julho de 2019



AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer as contribuições dos coorientadores Dr. Renato Dallaqua do laboratório associado de plasma do INPE com quem trabalhei grande parte do tempo, e a professora Dra. Flavia Cardoso da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo por ter disponibilizado a oportunidade da iniciação científica.

Agradeço também a ajuda do Dr. Edson Del Bosco que se dispôs a contribuir com sua experiência previa do projeto desenvolvido.

Por fim agradeço ao orientador Dr. Luis Eduardo Vieira pela participação no projeto e suporte quando houve necessidade.



RESUMO

Este relatório final de iniciação científica relata o desenvolvimento do projeto de geração de fontes de plasma por descarga em arco no vácuo com a finalidade de calibrar o telescópio solar, desenvolvido pelo COCEA/DIDGE a partir da análise do plasma gerado em laboratório, levando em conta a parte teórica do estudo espectrográfico e da prática utilizada para geração de tal plasma, a montagem de todo o aparato experimental em laboratório e os desafios encontrados pelo caminho para finalização do projeto.

Palavras-chave: Plasma. Telescópio Solar. Descarga em arco. Vácuo.



PLASMA SOURCES DEVELOPMENT TO SPECTROSCOPIC CALIBRATION OF THE SOLAR TELESCOPE MAGNETOGRAPH

ABSTRACT

This final report of scientific initiation detail the development of the project to generate plasma sources by vacuum-arc discharge with the intent to calibrate the solar telescope, which is being made by COCEA/DIDGE, from the analysis of the laboratory generated plasma, considering the theoretical part of the spectrographic study and the method used to generate that plasma, the whole experimental apparatus setup and the challenges we faced through the project.

Keywords: Plasma. Solar Telescope. Vacuum Arc Discharge. Vacuum.



LISTA DE FIGURAS

Figura 3.3.1 Catodo de Magnésio posicionado na câmara Fonte: Autor	10
Figura 3.3.2 Circuito carregador do banco Fonte: (Del Bosco, 1989)	11
Figura 3.3.3 Atrasador Fonte: Autor	11
Figura 3.2.2.1 Demonstração do Efeito Zeeman - Normal (esq.), Anômalo (dir.)	12
Figura 3.2.3.1 Níveis de energia sem a presença de campo magnético (esq.) e com campo magnético (dir.) - Efeito Zeeman - Fonte: (Stekel, 2018)	13
Figura 3.2.3.2 Efeito Stark no átomo de hidrogênio	14
Figura 3.2.3.3 Blueshift e Redshift.....	16
Figura 3.2.3.4 Bobina de Rogowski	16
Figura 3.2.3.5 Circuito descrito acima Fonte: (Del Bosco, 1989).....	17
Figura 3.2.3.6 Especificações da Espira Fonte: (Del Bosco, 1989)	18
Figura 4.1 Bomba de vácuo Fonte: Autor	20
Figura 4.2 Modulo da câmara usado para medições Fonte: Autor	22
Figura 4.3 Quatro das oito espiras usadas Fonte: Autor.....	23
Figura 4.4 Circuito RLC para geração do campo magnético Fonte: (Del Bosco, 1989)	23
Figura 4.5a Banco de Capacitores para geração do campo magnético Fonte: Autor	24
Figura 4.6 Esquema dos capacitores usado para geração do arco Fonte: (Del Bosco, 1989)	25
Figura 4.7 Banco de capacitores utilizado para geração do arco Fonte: Autor	26
Figura 4.8a Atrasador/Disparador 4.8b Trigger de alta tensão Fonte: Autor	26
Figura 4.9a e 4.9b Bobinas de Rogowski utilizadas Fonte: Autor	27
Figura 4.10 Equivalência dos integradores kA/V	28
Figura 4.11 Fontes utilizadas Fonte: Autor	28
Figura 4.12 Fonte: Autor	29
Figura 4.13 Fonte: Autor	29
Figura 5.1 Sinais de corrente nas bobinas e do arco no osciloscópio Fonte: Autor	30
Figura 5.2 Sinais de corrente nas bobinas e do arco ampliados no osciloscópio Fonte: Autor	30
Figura 5.3 Sinal da corrente nas bobinas com ruído Fonte: Autor	31
Figura 5.4 Campo magnético em $r = 0$	32
Figura 5.5 B em $r = 6$ e B em $r = 12$	32
Figura 5.6 Densidade de fluxo magnético e Linhas de campo.....	33
Figura 5.7 Gráfico da Tensão no banco de capacitores do campo magnético x Corrente nas bobinas Fonte: Autor	34



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Especificações Bomba de Vácuo Fonte: https://www.agilent.com/cs/library/datasheets/public/IDP-15_5991-7604EN_DataSheet_LR.pdf	21
Tabela 2 Fonte: Centrífuga de plasma com descarga em arco no vácuo aplicada a separação de isótopos estáveis (Del Bosco, 1989)	22
Tabela 3 Equivalência Rogowski Fonte: Autor.....	27
Tabela 4 Disparos com tensão no arco constante e tensão nas bobinas variável Fonte: Autor	34



SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	6
SUMÁRIO.....	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	9
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
3.1. FUNCIONAMENTO DE GERAÇÃO DE PLASMA POR DESCARGA EM ARCO NO VÁCUO ..	10
3.2. EFEITO ZEEMAN	12
3.2.1. O Efeito Zeeman Normal.....	12
3.2.2. O Efeito Zeeman Anômalo	12
3.2.3. Energia – Efeito Zeeman	13
3.3. EFEITO STARK.....	14
3.3.1. Efeito Stark Quântico-confinado (QCSE).....	15
3.4. EFEITO DOPPLER	15
3.5. BOBINA DE ROGOWSKI	16
3.6. GERAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1. BOMBA DE VÁCUO	20
4.2. CÂMARA DE VÁCUO	21
4.3. BOBINAS PARA GERAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO.....	22
4.4. BANCO DE CAPACITORES DO CAMPO MAGNÉTICO.....	23
4.5. BANCO DE CAPACITORES DO ARCO.....	25
4.6. DEMAIS EQUIPAMENTOS	26
4.7. MONTAGEM LABORATORIAL.....	28
5. ANÁLISE E RESULTADOS.....	30
6. CONCLUSÕES.....	35
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36



1. INTRODUÇÃO

Inicialmente o projeto de iniciação científica se apoiou na tese do Dr. Edson Del Bosco com título de “centrífuga de plasma com descarga em arco no vácuo aplicada a separação de isótopos estáveis” (Bosco, 1989) com o objetivo final de gerar um plasma de ferro e estudá-lo espectroscopicamente a fim de obter a leitura de suas linhas de campo em laboratório para futuramente fazer a calibração do telescópio solar desenvolvido pelo COCEA/DIDGE no INPE.

Dessa maneira foi montado todo um aparato experimental no prédio do laboratório associado de plasma no INPE (LAP/INPE) para geração de uma fonte de plasma por arco no vácuo, sendo utilizado parte do experimento já realizado pelo Dr. Edson Del Bosco em sua tese sobre o PCEN (plasma centrífuga), e outra parte sendo atualizada para melhor desempenho da análise esperada.

Utilizando das bobinas já existentes foi montada uma nova câmara de vácuo e utilizada novas fontes de geração de altas tensões para disparo do arco, tendo mantido os bancos de capacitores, resistores de carga e descarga e disparadores do experimento anteriormente citado.

Foi feito um estudo aprofundado sobre efeitos de campos magnético no plasma como o Efeito Zeeman e outros fenômenos como o Efeito Stark e o Efeito Doppler óptico para uma análise mais precisa das linhas espectrais que seriam observados ao longo do experimento. As observações alcançadas através da leitura do osciloscópio, que serão trazidas a tona ao decorrer do relatório, utilizou de duas Bobinas de Rogowski e medições do disparador e das fontes trifásicas.

Inicialmente a intenção seria gerar uma fonte de plasma de ferro e analisá-la com o espectroscópio, mas devido a um problema com a amostra que seria utilizada como catodo, que também será específica mais adiante, não foi possível realizar essa parte, tendo sido disparado apenas com uma amostra de magnésio.

Como utilizou-se de base a tese do PCEN em diversas oportunidades os resultados aqui obtidos neste experimento serão levados a comparação com os obtidos no experimento anterior que foi bem sucedido.

Ao final do relatório será descrito o que seria esperado do disparo do ferro com base na fundamentação teórica colhida ao longo do projeto.



2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O trabalho teve como finalidade científica a montagem do aparato, geração e análise de fontes de plasma para a calibração do projeto do telescópio solar que em desenvolvimento pelo COCEA/DIDGE no INPE – São José dos Campos.

Para tanto, a intenção era gerar fontes de plasma de magnésio inicialmente pela facilidade e experiência do coorientador responsável, após isso partir para a geração de plasma de carbono pela proximidade de suas linhas espectrais, com linhas espectrais de 657,9 e 658,5nm (carbono uma vez ionizado), sendo do ferro de 630,15 e 630,25nm (NIST, 2019) para com o ferro e então, por fim, partir para geração de plasma de ferro e sua análise e futura calibração do telescópio solar.

Devido a problemas com o catodo de ferro que seria utilizado para a geração do plasma foi obtido apenas disparos sobre a amostra de magnésio que tiveram seus dados analisados via osciloscópio e mostrados ao longo do relatório.

Outro objetivo do trabalho foi o estudo teórico dos efeitos gerados por campos magnéticos e outros fenômenos sobre o plasma como o Efeito Zeeman, Efeito Doppler óptico e Efeito Stark que serão destrinchados a seguir na seção de fundamentação teórica deste relatório.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. FUNCIONAMENTO DE GERAÇÃO DE PLASMA POR DESCARGA EM ARCO NO VÁCUO

Para o experimento foi utilizado um método de geração de plasma chamado de descarga em arco no vácuo, também chamado de descarga de catodo frio. Esse tipo de método para geração de plasma consiste em um catodo feito da amostra que se deseja gerar o plasma, como o da figura 3.1a, tal catodo possui uma pequena ponta condutora em seu centro que é então feita de anodo, esse anodo é então ligado num banco de capacitores que aqui chamamos de banco de capacitores do arco e será explicado mais adiante no capítulo seguinte.



Figura 3.3.1 Catodo de Magnésio posicionado na câmara Fonte: Autor

Esse banco é então carregado por uma fonte externa pelo circuito mostrado na figura 3.2, exceto pelo laser que foi tirado do experimento. No lugar utilizou-se de um trigger de alta tensão para gerar o arco.

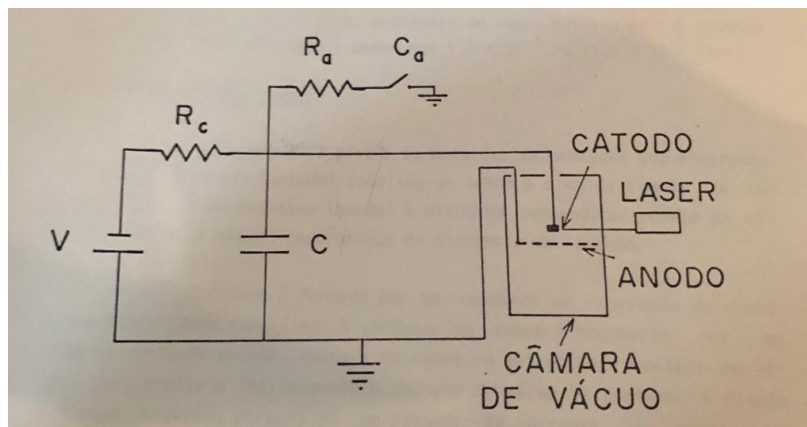


Figura 3.3.2 Circuito carregador do banco Fonte: (Del Bosco, 1989)

Ao dispararmos o trigger, um pulso de alta tensão é descarregado no anodo sendo suficiente para quebrar a permissividade do vácuo e gerar o arco, esse arco então é responsável pelo plasma que, uma vez feito, é mantido e então direcionado pelo campo magnético uniforme que existe no interior das bobinas, no caso do projeto realizado os dois, tanto o arco quanto o campo magnético foram feitos por pulsos, o arco com duração de aproximadamente 12ms e o campo magnético com duração (de maneira mais uniforme possível) de aproximadamente 300ms, como será demonstrado por gráficos e dados obtidos pelo osciloscópio no capítulo seguinte.

Como o arco e o campo tem tempos bem definidos foi utilizado um atrasador de disparo para ser possível obter o arco, e conseqüentemente o plasma, na parte mais uniforme do campo magnético, esse atrasador pode ser observado na imagem 3.3 a seguir.



Figura 3.3.3 Atrasador Fonte: Autor

3.2. EFEITO ZEEMAN

Um dos efeitos que podem ser observados durante o estudo do plasma é o Efeito Zeeman, esse comportamento do átomo foi observado pelo físico holandês Pieter Zeeman e refere-se à quando um átomo sofre ação de um campo magnético e é excitado, no processo de retorno ao estado fundamental, também chamado de “desexcitação”, são emitidas linhas espectrais que, então, separam-se em diversas componentes, tendo em vista que a separação ocorrida é proporcional a intensidade do campo magnético externo que o átomo foi exposto. Se este campo magnético for pouco intenso (menores décimos de um tesla) a separação ocorrida pelo efeito é menor que a separação da estrutura fina e, portanto, se dá proporcionalmente a intensidade do campo interno do próprio átomo.

O Efeito Zeeman pode ser explicado se dividido em dois casos, o Efeito Zeeman normal, que tem sua explicação na teoria clássica desenvolvida por Lorentz. E o Efeito Zeeman anômalo que é apenas explicado a partir da mecânica quântica.

Esse fenômeno é utilizado para o estudo de intensidade campos magnéticos de estrelas e de outros plasmas feitos em laboratório já que a partir dele é possível produzir magnetogramas que mostram a variação destes campos, por exemplo, no sol.

3.2.1. O Efeito Zeeman Normal

O Efeito Zeeman Normal é um caso especial desse fenômeno, é observado quando há transição entre estados onde o momento magnético se dá apenas pelo movimento orbital dos elétrons, ou seja, o spin total é igual a zero.

É possível perceber esse processo nas linhas espectrais do cádmio vermelho 643.8nm de acordo com experimento realizado pelo departamento de física da universidade internacional da florida (Boeglin, 2019). Devido a transição entre os estados $1D^2$ e $1P^1$, quando exposto a um campo magnético as linhas dividem-se em três.

3.2.2. O Efeito Zeeman Anômalo

O Efeito Zeeman Anômalo são casos mais genéricos do Efeito Zeeman que levam em consideração a influência dos spins dos elétrons (ou seja, o spin total é diferente de zero) no momento angular total do átomo, fazendo as linhas não dividirem-se em três como visto no Zeeman normal mas sim em mais linhas ou tendo os tripletes com maior espaçamento.

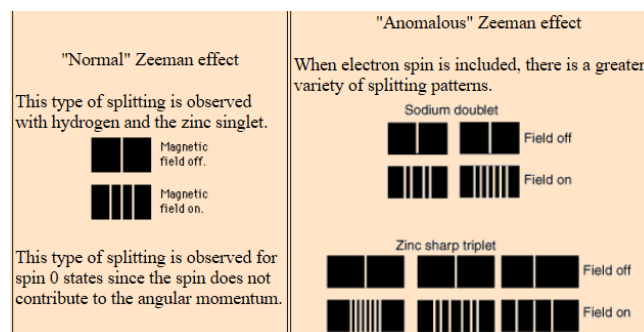


Figura 3.2.2.1 Demonstração do Efeito Zeeman - Normal (esq.), Anômalo (dir.)

3.2.3. Energia – Efeito Zeeman

Na presença de um campo magnético a energia do nível atômico é dada por (3.1)

$$E_{J,M} = E_J + \frac{\hbar e}{2m_e} g_L M B \quad (3.1)$$

Onde e é a carga elementar, m_e é a massa do elétron, \hbar é a constante de Planck reduzida, g_L é o fator de g Landé do nível de energia e M é o nível quântico magnético. O campo magnético divide os níveis de energia em subníveis $(2J+1)$ de diferentes energias, descritos por $M = -J, \dots, 0, \dots, +J$. O fator g de Landé é dado por (3.2) (Stekel, 2018):

$$g_L = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (3.2)$$

No Efeito Zeeman normal temos que $J = 0$, já no anômalo que $J \neq 0$. Na Figura 3.5 podemos ver a separação causada pelo Efeito Zeeman nos níveis de energia a partir da presença de um campo magnético.

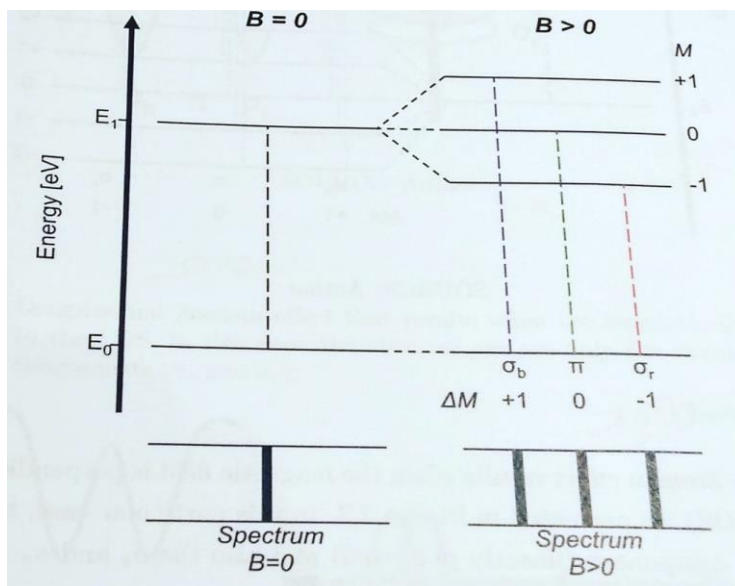


Figura 3.2.3.1 Níveis de energia sem a presença de campo magnético (esq.) e com campo magnético (dir.) - Efeito Zeeman - Fonte: (Stekel, 2018)

O Efeito Zeeman no comprimento de onda, com referencial do comprimento de onda sem atuação de um campo magnético, pode ser obtido a partir da expressão (3.3), onde g_{eff} é o fator de Landé efetivo, λ_σ é a mudança de comprimento de onda entre o centro de gravidade dos componentes σ , λ_0 é o comprimento de onda referencial, c é a velocidade da luz, m_e é massa do elétron e B é a intensidade do campo magnético.

$$|\Delta\lambda| = |\lambda_\sigma - \lambda_0| = \left[\frac{eB\lambda_0^2}{4\pi cm_e} \right] \cdot g_{eff} \quad (3.3)$$

3.3. EFEITO STARK

Outro efeito que pode ser observado durante o estudo do plasma é o Efeito Stark, o qual foi descoberto pelo físico alemão Johannes Stark em 1913, foi coincidentemente foi também descoberto de maneira independente pelo físico italiano Antonino Lo Surdo, esta descoberta rendeu a Stark o prêmio nobel de física em 1919.

Mais tarde Woldemar Voigt utilizando-se da explicação de Lorentz do Efeito Zeeman formulou classicamente cálculos de ligações quase-elásticas de elétrons sob ação de um campo elétrico, e, usando índices de refração obtidos empiricamente, estimou a separação das linhas espectrais do Efeito Stark. A estimativa estava algumas ordens de magnitude abaixo, mesmo assim Stark conseguiu observar o efeito de “splitting” em um átomo de hidrogênio excitado.

Tal efeito se dá também pela separação das linhas espectrais de um átomo quando este após ser excitado e exposto a um campo elétrico externo volta ao seu estado fundamental, podemos dizer que esse fenômeno é análogo ao Efeito Zeeman, mas para campos elétricos ao invés de campos magnéticos podendo ser observado tanto em linhas de emissão quanto linhas de absorção, sendo esse último as vezes chamado de Efeito Stark inverso.

Para tal efeito ocorrer inicialmente é necessário que o campo polarize o átomo e então interaja com o momento dipolo elétrico resultante, que por sua vez depende da intensidade do campo externo. A imagem a seguir demonstra o Efeito Stark no hidrogênio.

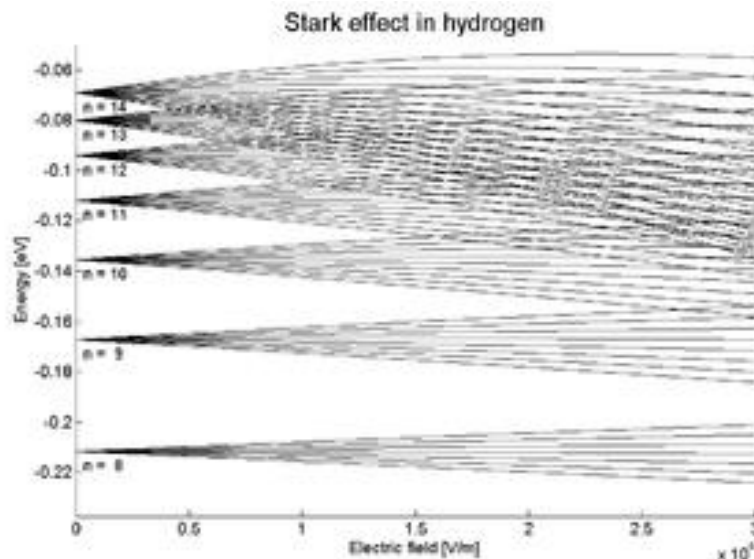


Figura 3.2.3.2 Efeito Stark no átomo de hidrogênio



3.3.1. Efeito Stark Quântico-confinado (QCSE)

O Efeito Stark quântico-confinado ou, em inglês, Quantum-confined Stark Effect é o fenômeno observado numa estrutura heterogênea semicondutora em que um material de pequeno gap de energia é “sandwichado” entre um material de grandes gaps, sendo assim o Efeito Stark é aumentado drasticamente pelas ligações de excítons, que se tratam de uma quasipartícula formado pela interação entre um elétron e um “buraco”.

Esse aumento no Efeito Stark se dá já que o elétron e o buraco se movem em direções opostas quando existe um campo elétrico em ação sobre o excíton, mas como estão confinados por entre um material com um grande gap de energia a quasipartícula não se separa.

3.4. EFEITO DOPPLER

Outro fenômeno que é levado em conta no estudo do plasma é o Efeito Doppler óptico, que se dá pela mudança de frequência da luz de acordo com a velocidade relativa do objeto observado para com o observador. Assim como ocorre com o Efeito Doppler clássico para ondas sonoras, o Efeito Doppler para ondas eletromagnéticas segue o mesmo princípio, mas para velocidades próximas da velocidade da luz.

Para entender esse fenômeno é necessário admitir a teoria da relatividade restrita de Einstein e conseqüentemente a dilatação temporal prevista por tal.

Para o estudo da superfície solar é observado que na baixa fotosfera o plasma sofre uma diminuição na sua temperatura e densidade de maneira que os fótons vindos do interior do sol consigam escapar para o espaço (apesar de em alguns casos haver novamente uma interação entre os fótons e o gás da fotosfera).

De acordo com a tese “Investigation of small-scale magnetic features on the solar surface” de von Tino L. Riethmuller (2013) se o fóton possuir um comprimento de onda correspondente a diferença entre dois níveis de energia tal fóton pode ser absorvido pelo gás presente na fotosfera (composto de elétrons, átomos neutros, íons e moléculas) portanto essa mesma partícula que absorveu o fóton previamente pode emitir outro de mesma energia caso não seja desexcitado por alguma colisão.

Como já sabido o gás presente na fotosfera está em movimento graças aos movimentos de fluxo na zona convectiva. Logo o Efeito Doppler para luz é observado em momentos que a nuvem de gás emite tais fótons. Esse efeito pode ser considerado não relativístico já que as velocidades são da ordem de alguns km/s (Riethmuller, 2013).

O Efeito Doppler também é observado de maneira microscópica causando o alargamento das linhas espectrais.

Tal efeito pode se demonstrar como Redshift ou Blueshift que seria o deslocamento da linha espectral tendendo para o vermelho, ou seja, com comprimento de onda maior e frequência menor ou para o azul, com comprimento de onda menor e uma frequência maior, como é observado na Figura 3.7.

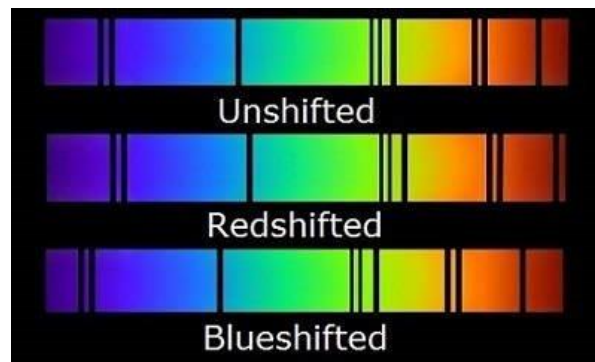


Figura 3.2.3.3 Blueshift e Redshift

Podemos considerar o Efeito Doppler a partir da equação (3.4)

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v_{LOS}}{c} \quad (3.5)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda no repouso, c é a velocidade da luz, v_{LOS} é a componente velocidade da nuvem de partículas (no caso descrito acima) na linha de visão.

3.5. BOBINA DE ROGOWSKI

A bobina de Rogowski, feita inicialmente pelo físico alemão Walter Rogowski, é um instrumento muito usado na medição de corrente alternada, pulsos de corrente (como é o caso do plasma feito por descarga de arco em vácuo), entre outros. Ela utiliza-se da lei de Faraday e lei de Ampère.

Se trata de uma bobina com N voltas por unidade de comprimento como mostra a figura abaixo:

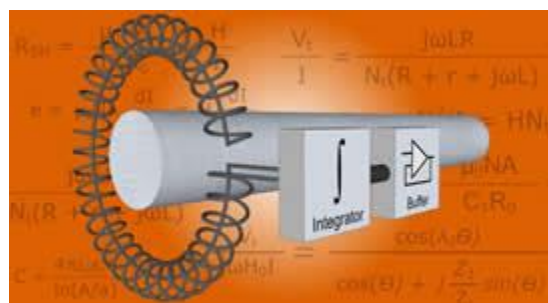


Figura 3.2.3.4 Bobina de Rogowski

A bobina forma possui uma área de seção transversal constante e tem as duas extremidades do fio conectados a um cabo e levado a um integrador, posteriormente, no caso do

experimento realizado durante o período de iniciação científica, ligado a um osciloscópio para leitura da corrente da corrente nas bobinas e da corrente no arco feito para geração do plasma.

3.5.1. Funcionamento da bobina de Rogowski

A bobina é colocada em volta do cabo que se deseja medir a corrente, como também é mostrado na imagem 3-5. Uma corrente alternada ou um pulso de corrente gera um campo magnético, tal campo magnético induz uma diferença de potencial e, conseqüentemente, uma corrente na bobina, com os dados intrínsecos ao material da bobina temos a tensão V , induzida na bobina, proporcional a corrente gerada na própria já que se trata de um loop fechado sem descontinuidades. Temos também a relação de proporcionalidade dada por:

$$V = -H \cdot \frac{dI}{dt} \quad (3.6)$$

Em que H é a indutância mútua entre a bobina e o condutor (no caso o cabo) e dI/dt é a taxa da corrente que passa no condutor. Como a bobina de Rogowski diminui a corrente medida precisamos de um amplificador para obtermos a medição correta, assim como um circuito integrador para alcançarmos a corrente I .

3.6. GERAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Utilizando o experimento anterior feito para a tese do Dr. Edson Del Bosco, o campo magnético foi feito de maneira pulsada já, segundo a tese, houve uma impossibilidade de encontrar condutores de cobres aptos para o projeto, sendo assim, era necessário gerar um campo magnético com duração maior que a duração de corrente do arco.

O esquema se dá por um banco de capacitores C que é energizado por uma fonte de tensão V , passando por um resistor de carga R_c . A descarga então é iniciada quando se fecha o circuito através de um tiristor T fazendo então a corrente passar pelas bobinas, representadas por L , e por um resistor de descarga R . Existe um diodo D utilizado como chave de curto quando o valor máximo de corrente é atingido nas espiras. Por fim, para aterrar é utilizada uma chave Ca através de um resistor de aterramento R_a . Como mostra o esquemático abaixo:

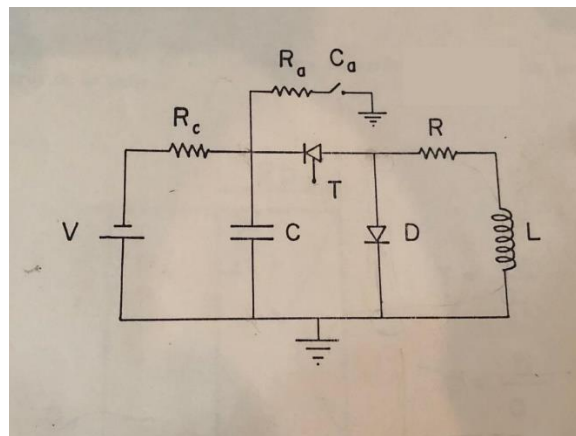


Figura 3.2.3.5 Circuito descrito acima Fonte: (Del Bosco, 1989)

A intensidade do campo magnético gerado depende de vários fatores da bobina e do circuito, foram feitos diversos cálculos matemáticos para gerar um pulso de campo magnético com tempo suficientemente longo e que o fosse o mais uniforme possível durante o trabalho usado como base.

O campo magnético dado no ponto central da espira é dado por:

$$B_0 = 10^{-4} \cdot j \cdot \lambda \cdot a_1 \cdot F(\gamma, \beta) \quad (3.7)$$

Sendo B_0 o campo magnético em teslas, j a densidade de corrente, a_1 o raio interno da espira, λ o fator de empacotamento e $F(\gamma, \beta)$ um fator adimensional dependente da geometria. Esse fator é dado por:

$$F(\gamma, \beta) = \frac{4\pi}{10} \beta \ln \frac{\gamma + (\gamma^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \quad (3.8)$$

Sendo β a razão da metade da espessura de uma espira pela distância do centro da espira até seu raio interno, já γ é a razão entre o raio externo da espira pelo seu raio interno.

Ainda segundo Del Bosco, temos a relação do produto $j \cdot \lambda$ dado por:

$$j \cdot \lambda = \frac{N \cdot I}{2b(a_2 - a_1)} \quad (3.9)$$

Onde N é número de voltas nas espiras, I a corrente a que está submetida a espira. Já a_1 é o raio interno da espira, a_2 o raio externo da espira e $2b$ a espessura da espira., como pode-se observar na imagem a seguir:

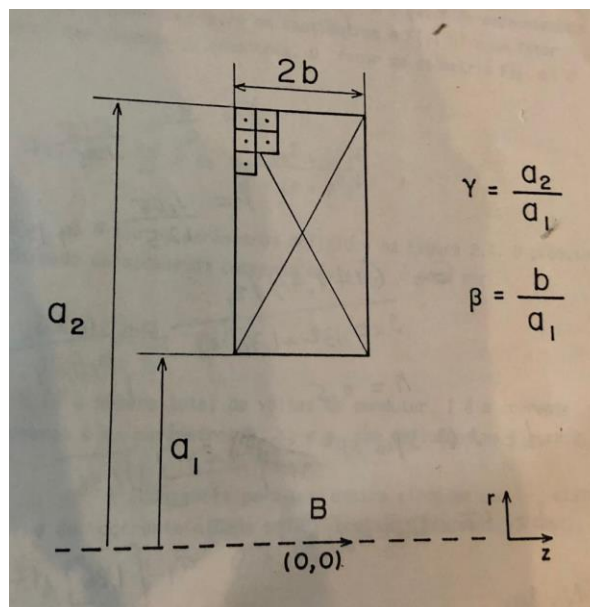


Figura 3.2.3.6 Especificações da Espira Fonte: (Del Bosco, 1989)



Com isso é perceptível que o campo gerado varia de acordo com a corrente aplicada nas bobinas já que os outros termos da equação acima são constantes (número de voltas, e fatores que dependem apenas do dimensionamento das bobinas chamados de a e b). Isso ficou mais visível no gráfico feito a partir dos resultados obtidos que será mostrado no capítulo seguinte.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O arranjo experimental foi feito, como já dito anteriormente, com base no experimento realizado pelo Dr. Edson Del Bosco em sua tese do PCEN, e constitui-se basicamente de uma bomba de baixo vácuo, uma câmara de vácuo, oito bobinas, dois bancos de capacitores, duas bobinas de Rogowski, circuitos de carga e descarga dos capacitores, integradores para as bobinas de Rogowski, um catodo do material que deve-se gerar o plasma, trigger de alta tensão, fontes, atrasador, osciloscópio para análise de resultados e disparadores. Todos esses equipamentos serão mais bem evidenciados a seguir.

4.1. BOMBA DE VÁCUO

A bomba de vácuo utilizada foi uma bomba de baixo vácuo levando a câmara a uma pressão absoluta de na casa de 10^{-2} bar com pouca variação.

A bomba da Agilent Technologies IDP-15 Dry Scroll Vacuum Pump, como mostrada na figura, foi posicionada logo abaixo na câmara.



Figura 4.1 Bomba de vácuo Fonte: Autor



Tal bomba possui as seguintes especificações conforme o fabricante:

Technical specifications

IDP-15 dry scroll single sided hermetic vacuum pump	
Peak pumping speed	60 Hz: 256 L/min (15.4 m ³ /h) 50 Hz: 214 L/min (12.8 m ³ /h)
Media	No corrosive, explosive or particulate forming gases
Ultimate pressure	1.33 x 10 ⁻² mbar (1 x 10 ⁻² Torr)
Max. inlet pressure	1.0 atmosphere (0 psig)
Max. recommended continuous inlet pressure	200 mbar (150 Torr)
Max. outlet pressure at nom voltage	1.4 atmosphere (6.5 psig)
Inlet connection	NW25
Exhaust connection	Female 0.25 inch, national pipe thread, (NW16 adapter provided)
Gas ballast	Female 0.25 inch, national pipe thread, (two positions)
Water vapor handling per Pneurop 6602	Gas ballast position 1: 20.7 grams/hr Gas ballast position 2: 235 grams/hr
Ambient operating temperature	5 to 45 °C (41 to 113 °F)
Storage temperature	-20 to 60 °C (-4 to 140 °F)
Motor rating	0.75 HP (560 W)
Operating voltages	100 VAC, 50/60 Hz 115 VAC, 60 Hz 220-230 VAC, 50/60 Hz
Motor thermal protection	Automatic thermal protection
Operating speed	60 Hz: 1725 rpm, 50 Hz: 1450 rpm
Cooling system	Air-cooled
Weight	Pump only: 34 kg (75 lbs), 45 kg (100 lbs)
Dimensions (H x W x L, mm)	364 x 333 x 485
Leak rate (with exhaust sealed)	<1 x 10 ⁻⁶ sccs (1 x 10 ⁻⁶ mbar.l/s)
Noise level	50 +/- 2 dB (A)
Vibration level at inlet	< 9 mms ⁻¹ rms
Hour meter	Integral hour meter provided
Emissions and immunity	EN 61236-1:2013 as a Class A device
Safety	EN/IEC 61010 3rd Edition certified

Tabela 1 Especificações Bomba de Vácuo Fonte: https://www.agilent.com/cs/library/datasheets/public/IDP-15_5991-7604EN_DataSheet_LR.pdf

4.2. CÂMARA DE VÁCUO

A câmara de vácuo utilizou-se de quatro módulos para sua montagem, tendo esses sido conectados por o-rings e fixados com quatro grampos em cada conexão, a câmara possui um diâmetro de 220mm e sua extensão é de 1223mm.

Durante sua extensão a câmara possui dois módulos com janelas para ser possível fazer medições, obter dados e proporcional o vácuo, cada módulo possui três janelas distribuídas igualmente no seu perímetro, como mostra a figura 4.2.

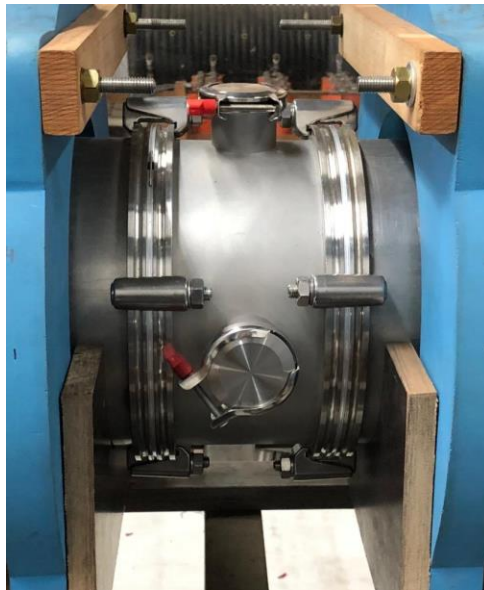


Figura 4.2 Módulo da câmara usado para medições Fonte: Autor

A montagem laboratorial será explanada de maneira mais aprofundada mais adiante neste capítulo.

4.3. BOBINAS PARA GERAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Para geração do campo magnético foram utilizadas oito bobinas magnéticas do experimento PCEN. Como pode-se observar na tabela 2 as bobinas seguem a seguinte relação entre diâmetro externo/interno e espessura, tendo as espiras 20 voltas de condutor para cada enrolamento.

Os parâmetros das bobinas podem ser observados na seguinte tabela:

		a1	a2	2b
1 ESPIRA	TEORIA	12,5	21,5	3,3
	MEDIDA	12,5	22	3,4
CONJUNTO	TEORIA	12,5	21,5	53
	MEDIDA	12,5	22	62

Tabela 2 Fonte: *Centrífuga de plasma com descarga em arco no vácuo aplicada a separação de isótopos estáveis (Del Bosco, 1989)*

As espiras foram enroladas utilizando uma resina epóxi 208 Scotchast da 3M como colante, segundo Del Bosco, para aumentar a rigidez mecânica, melhorar a proteção do condutor e conseguir um sistema de sustentação adequado. Por isso a aparência azulada das espiras como mostrado na figura 4.3.



Figura 4.3 Quatro das oito espiras usadas Fonte: Autor

4.4. BANCO DE CAPACITORES DO CAMPO MAGNÉTICO

Para geração do campo magnético utilizou-se um circuito RLC série, como mostrado na figura 4.4, onde o C representa o banco de capacitores.

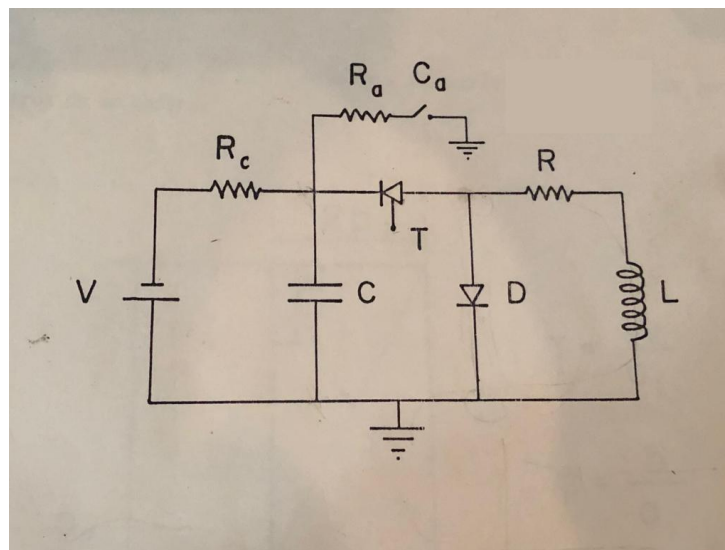


Figura 4.4 Circuito RLC para geração do campo magnético Fonte: (Del Bosco, 1989)

Tal circuito possui três soluções: subamortecido e oscilatório, criticamente amortecido e sobre-amortecido. Para o experimento deseja-se ter um circuito subamortecido e oscilatório pois este possui o maior pico de corrente, por isso, utilizando um fator de amortecimento $d < 1$ os valores experimentais da indutância e resistência da tese de Del Bosco temos um banco de capacitores com $C < 3F$.

Sendo assim utilizou-se o aparato já existente de capacitores eletrolíticos Giga-Elco 87.000 do laboratório, para a geração do campo magnético, que consiste em 25 capacitores sendo 5 colunas em paralelo de 5 capacitores e série, tendo como um total de 8 unidades dessas de capacitores (como mostrado na figura 4.5a) totalizando 200 capacitores de 2,5mF cada resultando numa capacitância total de 20mF e carga máxima de tensão de 1,6kV, tendo a energia máxima armazenada de 25,6kJ.

A disposição do banco de capacitores no laboratório pode ser observada na imagem 4.5a a seguir:



Figura 4.5a Banco de Capacitores para geração do campo magnético Fonte: Autor

E cada unidade básica pode ser observada na imagem 4.5b a seguir:

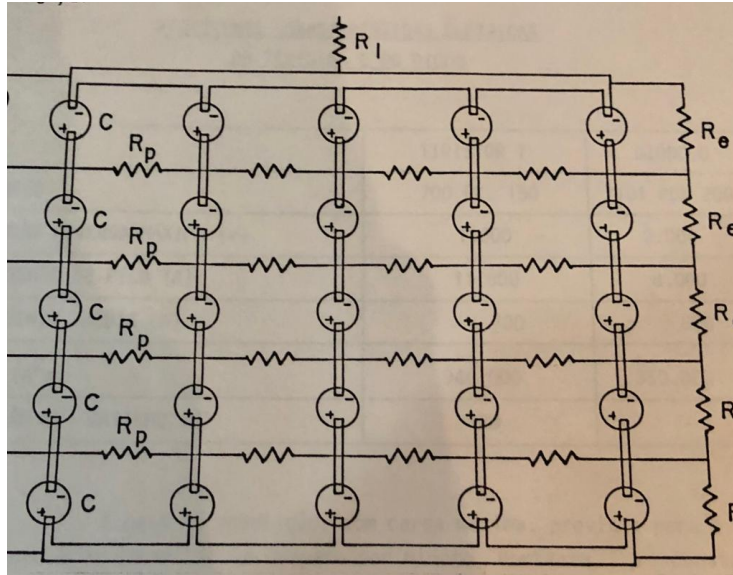


Figura 4.5b Unidade básica de capacitores esquematizada Fonte: (Del Bosco, 1989)

4.5. BANCO DE CAPACITORES DO ARCO

Para o banco de capacitores do arco foi também utilizado o aparato já existente no laboratório, mas, diferente do banco de capacitores do campo magnético, este pode ser considerado um circuito RC ao invés de RLC.

Como tem-se um campo magnético pulsado o fator de decaimento do arco deve ser ordens de grandeza menor (100 vezes menor segundo Del Bosco) que o do campo magnético para que o arco se forme durante o período uniforme deste campo, sendo assim o banco do arco tem sua capacitância em cerca de 32mF, usando os mesmos capacitores do outro banco foi feito o que foi chamado de unidade básica que é formada por dois capacitores em série, tendo dez colunas dessa unidade básica ligadas em paralelo.

A capacitância do banco ficou em 50mF com tensão de carga máxima de 640V, podendo armazenar 10,2kJ de energia (Del Bosco, 1989).

O esquema de montagem do banco segue na figura 4.6:

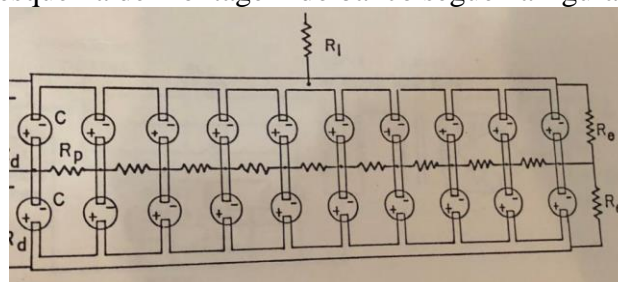


Figura 4.6 Esquema dos capacitores usado para geração do arco Fonte: (Del Bosco, 1989)

Já a disposição do banco no laboratório segue na figura 4.7:



Figura 4.7 Banco de capacitores utilizado para geração do arco Fonte: Autor

4.6. DEMAIS EQUIPAMENTOS

Além dos equipamentos já citados foram utilizados um trigger de alta tensão que pode ser observado na figura 4.8a para dar início a geração do plasma fazendo o arco inicial e atrasadores, junto com os disparadores, para ser possível fazer com que o arco exista durante o período mais uniforme do campo magnético que pode ser observado na imagem 4.8b.



Figura 4.8a Atrasador/Disparador 4.8b Trigger de alta tensão Fonte: Autor

Também se utilizou duas bobinas de Rogowski que podem ser observadas na imagem 4.9a e 4.9b que já tiveram seu princípio explicado no capítulo anterior e cada uma delas ligadas a um integrador que possuem equivalência kA/V demonstrados na tabela 3.

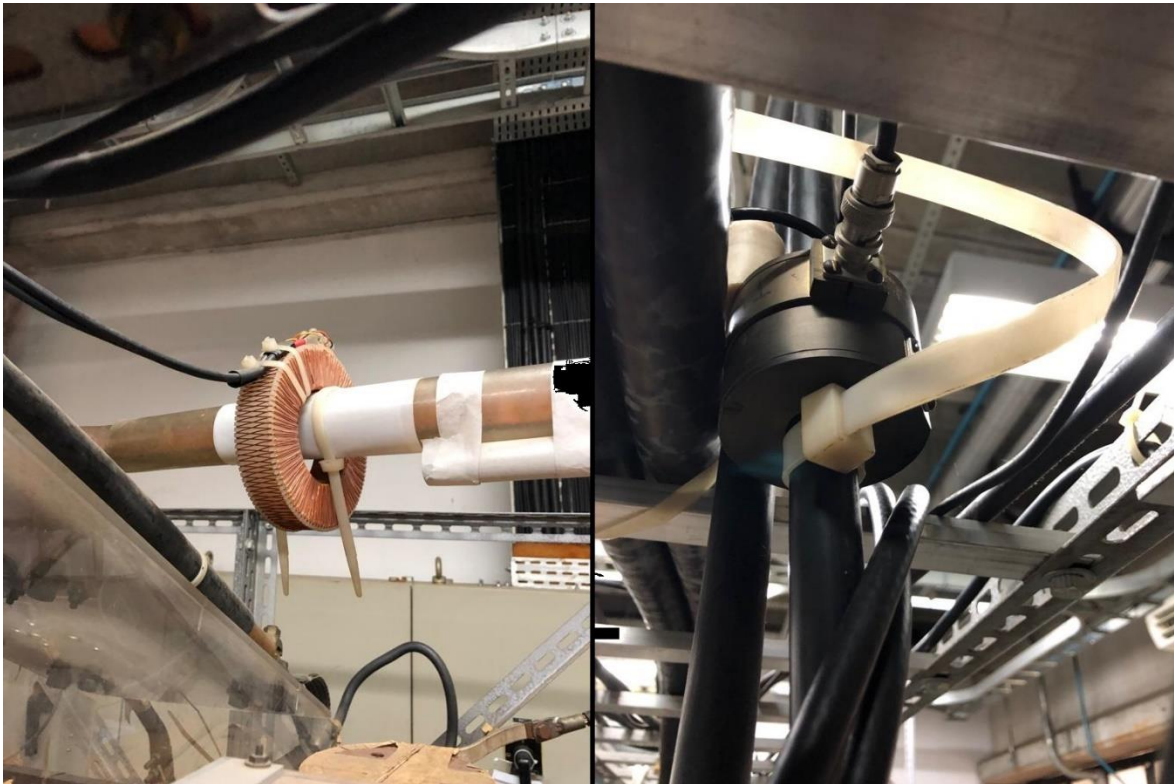


Figura 4.9a e 4.9b Bobinas de Rogowski utilizadas Fonte: Autor

INTEGRADOR	I1-X1	IG1
ROGOWSKI	RA1	RB2
kA/V	2,2±0,09	0,449±0,014

Tabela 3 Equivalência Rogowski Fonte: Autor

Dados retirados do laboratório, segundo a imagem 4.10.

INTEGRADOR ROGOWSKI ↓ KA/V	$I_1 \cdot X1$	$I_1 \cdot X10$	$I_2 \cdot X1$	$I_2 \cdot X10$	I_{G3}	I_{G1}	I_{G2}
	RA1	$2,20 \pm 0,09$	$0,193 \pm 0,008$	$2,18 \pm 0,09$	$0,194 \pm 0,008$	$2,32 \pm 0,07$	
RA2	$2,20 \pm 0,09$	$0,194 \pm 0,007$	$2,20 \pm 0,09$	$0,199 \pm 0,008$	$2,31 \pm 0,07$		
RB1						$0,453 \pm 0,014$	$0,449 \pm 0,014$
RB2						$0,449 \pm 0,014$	$0,449 \pm 0,014$

Figura 4.10 Equivalência dos integradores kA/V

Por fim foram também utilizadas duas fontes, uma para geração do arco e uma para geração do campo da Magna-Power, tendo a fonte para o campo magnético uma tensão máxima de 1,5kV mas sendo utilizada apenas até 0,5kV e a fonte do campo com capacidade de carga máxima de 1kV mas sendo utilizada apenas até 0,08kV devido a não haver necessidade de levar os equipamentos até o limite que pode ser trabalhado para obter os resultados desejados.



Figura 4.11 Fontes utilizadas Fonte: Autor

4.7. MONTAGEM LABORATORIAL

O aparato usado constitui-se de uma câmara de aço inoxidável totalmente vedada para possibilitar a existência de um vácuo, como já mostrado anteriormente, que é de extrema importância para gerar o plasma e conseguir estudá-lo de maneira que não haja interferências de elementos externos.

Essa câmara é constituída, primordialmente, de quatro partes, dois cilindros de 0,42m de comprimento por 0,24m de diâmetro com aberturas apenas nas extremidades, tais cilindros estão representados na figura 4.12 por (A) e (B), e outros dois cilindro de 0,125m de comprimento por 0,24m de diâmetro com três aberturas de 0,055m de diâmetro ao seu redor e aberturas em suas extremidades, está representado na figura 4.12 por (C).

Os três cilindros são conectados por O-rings (figura 4.12 – D) para selar e possibilitar o vácuo, além de quatro grampos (figura 4.12 – E) em cada conexão. Também foram usados O-rings e grampos para selar as extremidades restantes com discos de 0,24m de diâmetro por aproximadamente 0,015m de espessura (figura 4.13 – A).

Essa câmara foi preparada de maneira que ficasse dentro das oito bobinas de forma o mais uniformemente distribuída possível, no caso com um espaçamento médio de 0,037m, com exceção da parte central que possui espaçamento maior para o posicionamento dos equipamentos de medição nas aberturas do cilindro central (figura 4.12 – G), para isso foi utilizado calços de madeira (figura 4.12 – H) do laboratório segurados a partir de quatro hastes (figura 4.13 - B) com comprimento de 0,38m.

Para que a câmara fosse centralizada dentro das bobinas foram feitos quatro calços especiais em forma de meia lua (figura 4.12 - I) e posicionados no decorrer do comprimento desta. Para testar se o vácuo desejado seria realmente alcançado foi utilizada uma bomba mecânica da Agilent Technologies IDP-15 Dry Scroll Vacuum Pump (Agilent Technologies, 2019) e foi alcançado um vácuo na ordem de $1 \cdot 10^{-2}$ mBar que foi medido por um sensor Pirani Gauge também da Agilent Technologies PVG-500 (Agilent Technologies, 2019).

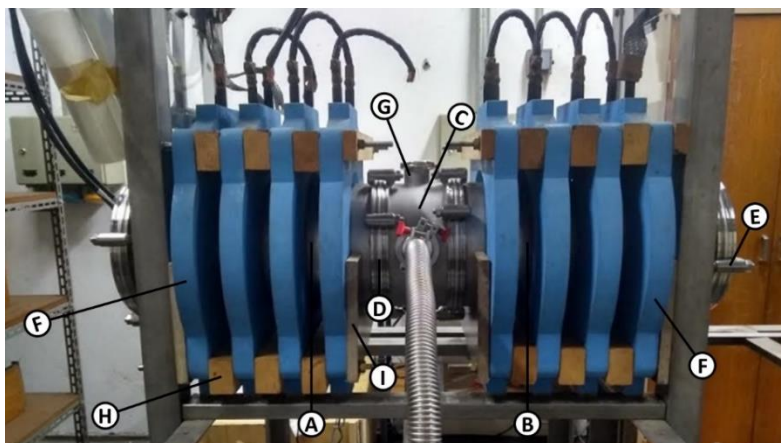


Figura 4.13 Fonte: Autor

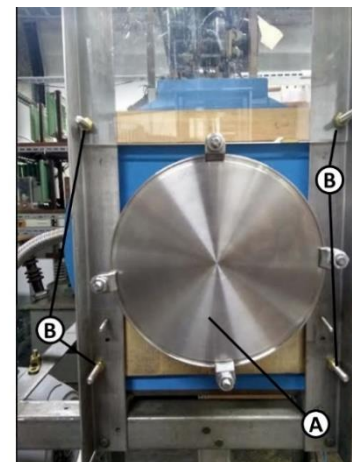


Figura 4.12 Fonte: Autor

5. ANÁLISE E RESULTADOS

Ao dispararmos o experimento com um catodo de magnésio obteve-se alguns resultados já esperados e previstos em teoria, mas também se notou certos problemas que logo foram solucionados. A seguir segue a imagem obtida através do osciloscópio para a curva do arco e do campo magnético:



Figura 5.1 Sinais de corrente nas bobinas e do arco no osciloscópio Fonte: Autor

Na figura 5.1 pode-se observar a duração do campo magnético em comparação com a duração do arco, sendo o campo magnético muito mais duradouro, sendo assim, como dito anteriormente, os atrasadores foram usados para colocar o arco durante o pico mais uniforme do campo magnético, nessa imagem também observa-se o sinal do arco invertido, pois o sinal seria negativo já que ele é ligado no anodo da fonte.

Agora na figura 5.2 temos os mesmos sinais obtidos ampliados para melhor visualização do disparo.

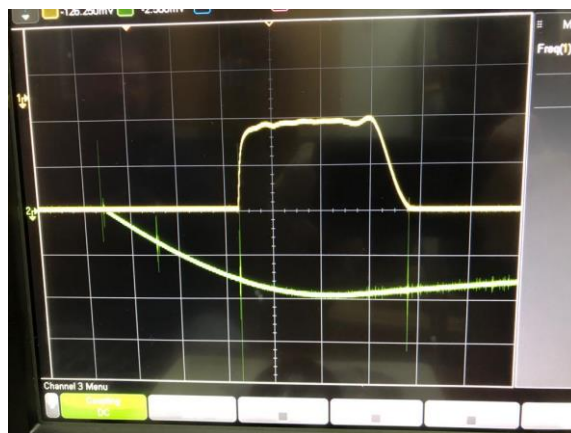


Figura 5.2 Sinais de corrente nas bobinas e do arco ampliados no osciloscópio Fonte: Autor

Inicialmente, nos primeiros disparos, estava sendo obtido uma leitura defasada do sinal da corrente que se passa nas bobinas (sinal do campo magnético), já que este começava de maneira esperada mas no seu final não voltava ao zero e sim se tornava um sinal positivo, vários testes foram feitos para tentar entender o fenômeno e se chegou à conclusão que as bobinas de Rogowski utilizadas eram feitas de ferrite o que causava uma indutância e o sinal era distorcido. Para obtermos as medidas de maneira desejada foram trocadas as bobinas de Rogowski e seus respectivos integradores.

Mas após a troca ocorreu um novo problema em que o sinal, também da corrente nas bobinas, era obtido com muito ruído, como é observado na imagem 5.3

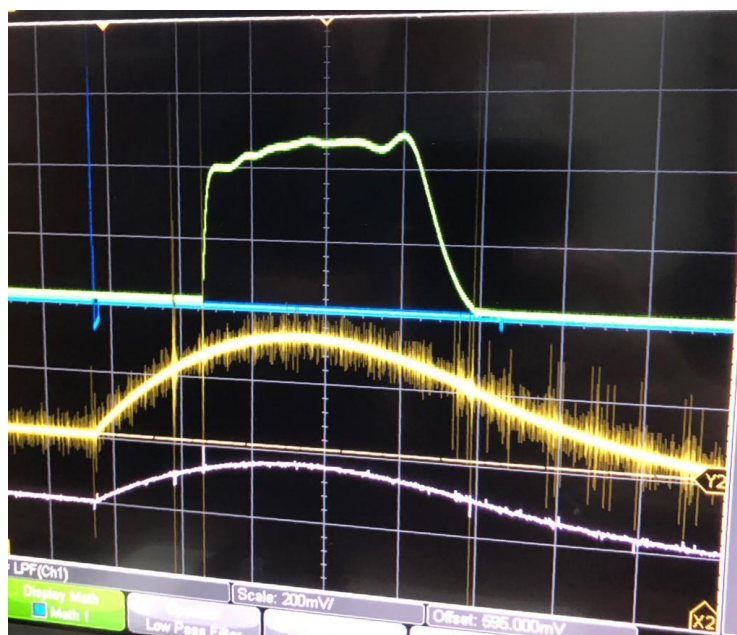


Figura 5.3 Sinal da corrente nas bobinas com ruído Fonte: Autor

Sendo assim tentou-se usar um filtro do próprio osciloscópio (sinal em rosa) para analisar os resultados, mas não satisfeitos foi-se atrás do problema, que acabou sendo um dos integradores novos utilizados que não estavam aterradas devidamente, por isso, a ligação do cabo do osciloscópio com o integrador estava funcionando como uma antena, captando pequenos sinais de alta frequência, que para nós eram ruídos. Isolou-se então a ligação do cabo do osciloscópio com o integrador e aterrou os integradores junto ao osciloscópio, obtendo assim o sinal limpo que é visto na imagem 5.1 e 5.2.

Para a análise do campo magnético foi utilizado um software para geração de modelos visuais de como o campo, em teoria, deveria se comportar para o caso das bobinas e arranjo

Experimental que possuíamos. Inicialmente foi gerado a imagem do campo magnético em $r = 0$, que representa o campo no centro das bobinas no decorrer da extensão da câmara.

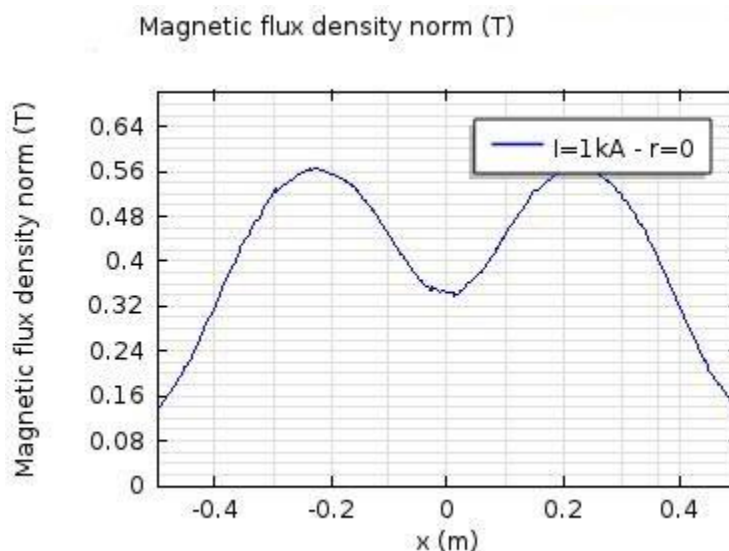


Figura 5.4 Campo magnético em $r = 0$

Pode ser notado um decréscimo no valor do campo magnético em $x = 0$ que seria o centro do comprimento da câmara, isso deveu-se ao fato de haver um “buraco” para o posicionamento da aparelhagem para análise do plasma, sendo assim, onde quatro bobinas estavam presentes teve-se um pico de campo, após isso um decréscimo no campo e novamente um pico onde a outra metade das bobinas estavam posicionadas, mas isso em nada atrapalhou na geração do plasma.

A seguir temos o campo magnético em $r = 6\text{cm}$ (figura 5.5a), ou seja, o campo magnético na extensão da câmara de vácuo a 6cm do centro e o campo magnético em $r = 12\text{cm}$ que seria durante a extensão da câmara mas logo acima de sua superfície, levando em consideração que a câmara possui 11cm de raio.

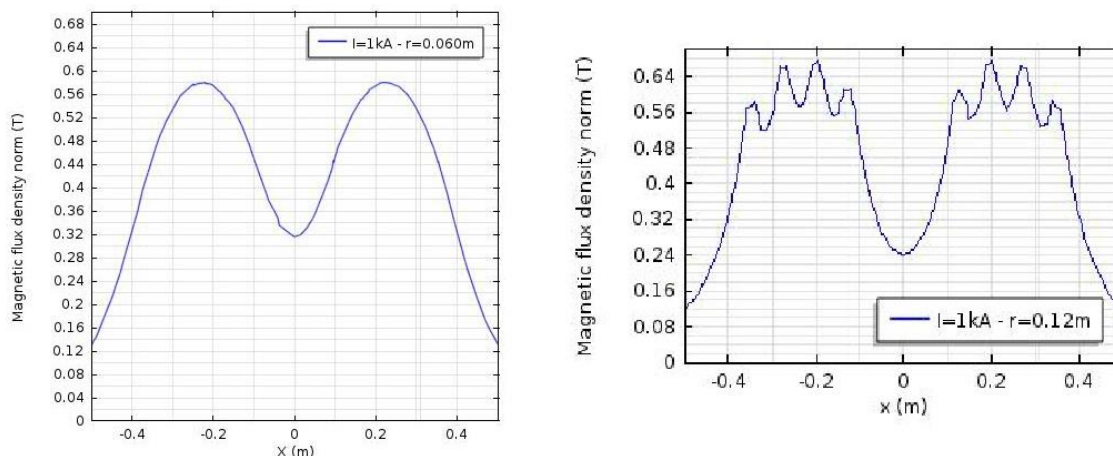


Figura 5.5 B em $r = 6$ e B em $r = 12$

É visível que o campo a 6cm do centro não varia muito do campo no centro da câmara de vácuo, assim como visível era esperado. Já o campo logo acima da superfície da câmara segue o mesmo padrão de gráfico, mas possui quatro picos que podem ser explicados pela interferência das bobinas que, nesse ponto, já estão muito próximas de onde pretende-se medir e, portanto, geram influência sobre o campo.

Também fez-se gráficos com o valor do campo ao decorrer das bobinas como mostra a figura 5.6, sendo a figura 5.6a a densidade de fluxo magnético no plano xy partindo do meio da câmara, ou seja, com o experimento visto de cima. E a imagem 5.6b é visto as linhas de campo obtidas com essa disposição de bobinas, também no plano xy.

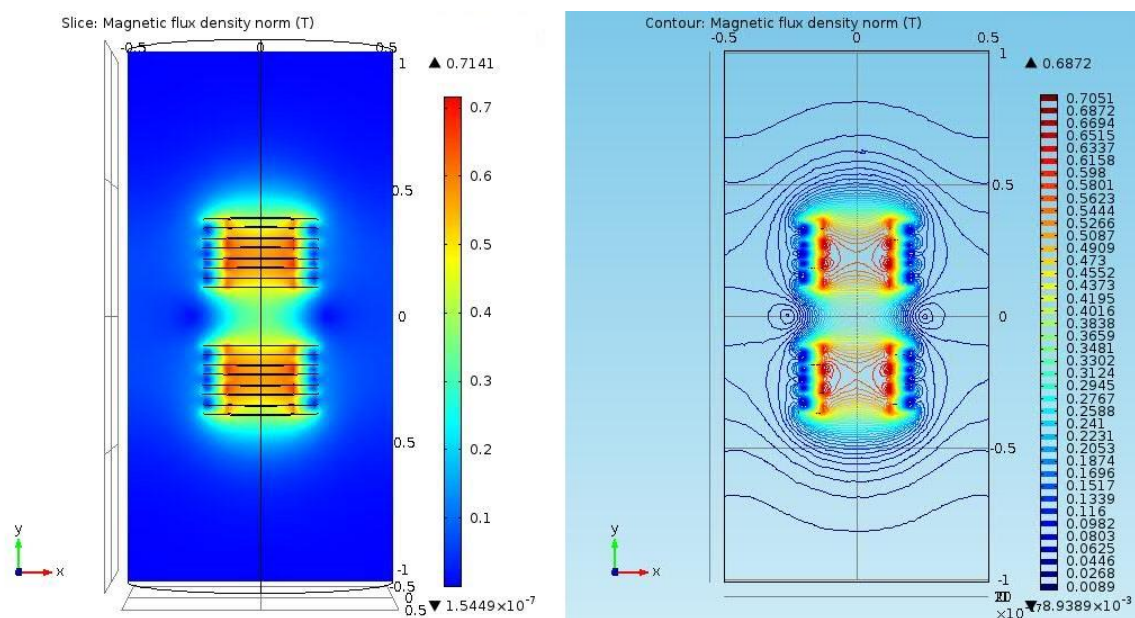


Figura 5.6 Densidade de fluxo magnético e Linhas de campo

Vê-se novamente nesta imagem que a não uniformidade das bobinas magnéticas no centro da câmara influenciou no fluxo magnético que, nesse ponto, tem seu valor reduzido, mas, a figura 5.5b mostra que as linhas de campo, apesar de influenciadas, não alteram sua direção nem sentido devido “buraco” que talvez se fosse maior afetaria isso e, conseqüentemente, o processo de direcionamento do plasma exercido pelo campo magnético.

Finalmente também foram tiradas diversas medidas dos disparos mantendo o valor da corrente do arco constante a 80V e alterando o valor da corrente nas bobinas, alterando assim o valor do campo magnético, que é diretamente proporcional ao valor da corrente nas bobinas. Os valores foram analisados para cinco disparos entre 100V e 500V (na fonte) igualmente espaçadas, gerando a seguinte tabela e gráfico:



DISPARO	TENSÃO NO ARCO (V)	TENSÃO NO CAMPO (V)	TENSÃO DO INTEGRADOR DO ARCO (V)	TENSÃO DO INTEGRADOR DO CAMPO (V)	CORRENTE REAL DO CAMPO (A)
1	80	100	0,12	0,2	90
2	80	193	0,12	0,4	180
3	80	302	0,12	0,6	270
4	80	400	0,12	0,75	337,5
5	80	500	0,12	1	450

Tabela 4 Disparos com tensão no arco constante e tensão nas bobinas variável Fonte: Autor

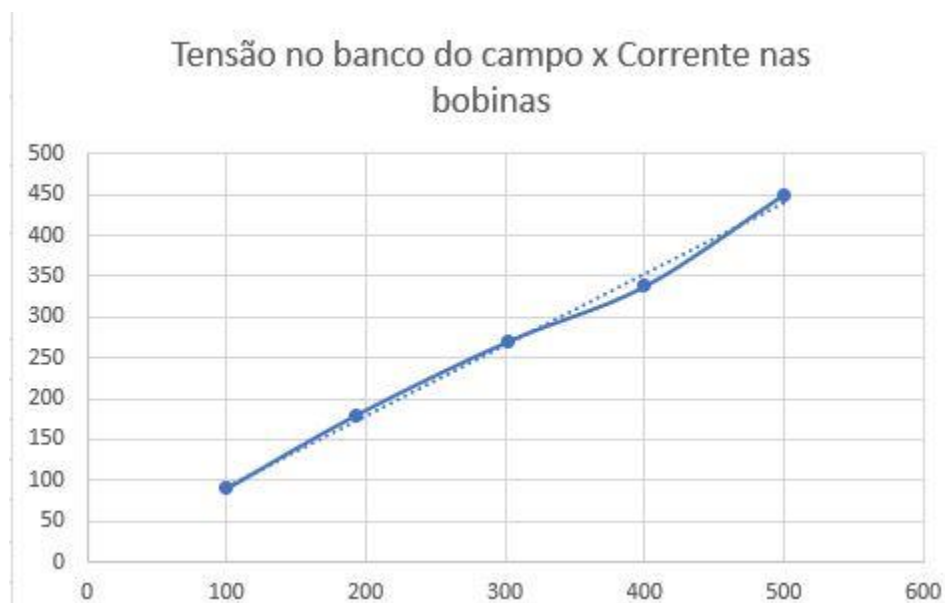


Figura 5.7 Gráfico da Tensão no banco de capacitores do campo magnético x Corrente nas bobinas Fonte: Autor

Sendo possível observar que segue um padrão quase linear, onde a reta sólida é a reta de ligação dos pontos experimentais e a reta pontilhada é a reta de tendência. Isso segue exatamente o esperado já que a corrente nas bobinas magnéticas deve ser linear em relação a tensão aplicada no banco dos capacitores.

6. CONCLUSÕES

Após mais de um ano de trabalho e utilizando o aparato já existente no laboratório foi possível obter as primeiras medições do plasma, de magnésio, gerado. Mesmo não alcançando as medições espectroscópicas esperadas do ferro, em grande parte devido à dificuldade de disponibilidade de uma amostra de ferro que pudesse ser usada como catodo uma vez que é necessário um trabalho meticuloso sobre tal para que esta possa ser usada de facto.

Foi possível observar o efeito do campo sobre as medições no osciloscópio e gerar o plasma por descarga em arco no vácuo no final das contas. O enfoque inicial sobre toda a teoria do plasma foi em parte observado no decorrer do projeto de iniciação científica, mesmo que não tenhamos obtidos resultados experimentais relativos a isso.

Para a calibração do telescópio solar será necessário realmente o uso do ferro, mas espera-se, futuramente, iniciar um trabalho de miniaturização de todo equipamento de geração de plasma por descarga em arco.

Apesar dos resultados não apresentarem as leituras do plasma em si a menos de sinais de campo magnético e arco observou-se um cumprimento da teoria estudada anteriormente e não há por que pensar que seria diferente sobre as leituras que hão de ser adquiridas no futuro com a continuidade do projeto.

Com o uso de partes do experimento antigo PCEN foi feita uma atualização do mesmo o que exigiu várias mudanças como a alteração da câmara de vácuo para o posicionamento de módulos que permitirão as medições do efeito Zeeman e Doppler sobre as linhas de ferro. O uso de novas fontes de alimentação trifásicas fez com que tivesse de ser feito um novo rearranjo da fiação elétrica, terra e sistema de segurança com diversas redundâncias.

Por fim com a mudança da câmara de vácuo e toda sua disposição também foi necessário rearranjar o posicionamento das bobinas magnéticas e, portanto, foi feita toda a simulação do campo magnético em computador (como mostrado nos capítulos anteriores) que, pretende-se medir futuramente de maneira experimental com um gaussmeter.

Sendo assim, visando a calibração do telescópio solar, chegamos as seguintes conclusões de como prosseguir a partir daqui, que seria a diminuição ou miniaturização da câmara de vácuo, passando de mais de um metro de extensão e 22cm de diâmetro nesse experimento para algo em torno de 25cm de comprimento e 10 de diâmetro; compactar todo o sistema de vácuo de acordo com o tamanho da câmara, atentando-se para as condições de fabricantes e do mercado disponível; Fazer uma fonte de geração de plasma DC já que a geração de plasma em arco no vácuo possui a propriedade de ser mantida mesmo em baixa tensão, tendo em vista isso, uma fonte de 50V por 100A seria suficiente para manter a descarga em arco contínua e não mais pulsada como temos atualmente.

Também seria possível o estudo e utilização de ímãs permanentes no lugar de bobinas magnéticas para a geração de um campo magnético DC com o intuito de miniaturizar ainda mais todo aparato experimental; além disso também propõe-se substituir o gatilho para um gatilho manual por contato entre eletrodos catodo/anodo eliminando assim a necessidade de um trigger de alta tensão para gerar o arco inicial.



7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agilent Technologies*. (05 de Fevereiro de 2019). Fonte: Datasheet IDP-15:
https://www.agilent.com/cs/library/datasheets/public/IDP-15_5991-7604EN_DataSheet_LR.pdf
- Agilent Technologies*. (05 de Fevereiro de 2019). Fonte: Datasheet PVG-500:
https://www.agilent.com/cs/library/datasheets/Public/PVG_Active_Gauges_DS.pdf
- Anders, A. (2008). *Cathodic Arcs*. Berkeley: Springer.
- Bicknell, G. V. (1 de Fevereiro de 2019). *Australian National University*. Fonte: Site da Australian National University:
http://www.mso.anu.edu.au/~geoff/HEA/8_Relativistic_Effects.pdf
- Boeglin, W. U. (1 de Fevereiro de 2019). *Departamento de física da universidade internacional da florida*. Fonte: Wanda.fiu.edu:
http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/zeeman_effect.html
- Bosco, E. D. (1989). Centrifuga de Plasma com descarga em arco no vácuo aplicada a separação de isótopos estáveis. *Tese*. São José dos Campos.
- Diversos. (1 de Fevereiro de 2019). *Science Direct*. Fonte: sciencedirect.com:
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/stark-effect>
- Eisberg, R., & Resnick, R. (1985). *Física Quântica - átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Rio de Janeiro: Campus.
- Griem, H. R. (1974). *Spectral Line Broadening By Plasmas*. Nova Iorque/Londres: Academic Press.
- Iniesta, J. d. (2003). *Introduction to Spectropolarimetry*. Madrid: Cambridge.
- Klus, H. (1 de Fevereiro de 2019). *The Star Garden*. Fonte: thestargarden.co.uk:
<http://www.thestargarden.co.uk/Life-on-other-planets.html>
- Leonard, S. L., & Huddlestone, R. H. (1965). *Plasma Diagnostic Techniques*. Nova Iorque: Campus.
- Nave, R. (1 de Fevereiro de 2019). *Hyper Physics*. Fonte: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/zeeman.html#c4>
- NIST. (Julho de 2019). *National Institute of Standards and Technology - Physical Meas. Laboratory*. Fonte: NIST.
- Riethmuller, v. T. (2013). *Investigations of small-scale magnetic features on the solar surface*. Dingelstädt/Eichsfeld.
- Stark, J. (1914). *Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien I. Quereffekt (Observations of the effect of the electric field on spectral lines I. Transverse effect)*. Annalen der Physik.
- Stekel, T. R. (2018). *Study of Magnetic Structures of an Arch Filament System in the Photosphere and Chromosphere*. São José dos Campos.
- Urone, P. P., Hinrichs, R., Dirks, K., & Sharma, M. (1 de Fevereiro de 2019). *Physics LibreTexts*. Fonte: Site da Physics LibreText:
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/5%3A__Relativity/5.7%3A_Doppler_Effect_for_Light](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/5%3A__Relativity/5.7%3A_Doppler_Effect_for_Light)
- Voigt, W. (1901). *(On the electric analogue of the Zeeman effect)*. Annalen der Physik.