

GERAÇÃO DE PLASMAS METÁLICOS NO EXPERIMENTO PCEN

Clênio Ricardo da Fonsêca Sobreira
Aluno do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Orientador : Renato Dallaqua , Pesquisador
Laboratório Associado de Plasma

Atualmente há um crescimento no uso de isótopos em áreas tais como: energia nuclear, agricultura, medicina nuclear, ciências biomédicas, química, física nuclear e etc. Com relação à geração de energia, utiliza-se o isótopo urânio-235 enriquecido a 2-3% com consumo de centenas a milhares de toneladas por ano. Como exemplo, uma usina nuclear de 1000MW (6,6TWh/ano, aproximadamente a energia consumida em Paris em um ano), consumirá 27 toneladas de urânio (2-3% de enriquecimento, reator PWR) ou 160 toneladas de urânio natural. Difusão gasosa e centrífuga mecânica são os métodos comercialmente usados para a obtenção do urânio-235 enriquecido. De particular interesse são as pesquisas em medicina nuclear e ciências biomédicas (utilizando isótopos estáveis), onde o desenvolvimento de um tratamento ou medicamento de uso corrente terá um grande retorno social e financeiro. Havendo um crescimento no consumo de isótopos estáveis ocorrerá uma procura a novos métodos de separação isotópica a custos mais baixos, uma das finalidades do experimento PCEN.

Até a presente data, plasmas metálicos de C, Mg, Zn, Ca e Pb tem sido obtidos facilmente. No entanto plasmas de Al, Ti, Ni e Cu tem sido obtidos marginalmente, isto é, há uma porcentagem alta de falha no chaveamento da descarga em arco no experimento PCEN. A energia obtida por meio de laser de CO₂ (o chaveador da descarga em arco) está no limiar para a formação do plasma que fechará a descarga principal para esses catodos. Para metais de ponto de fusão elevados como Zr, Ta, W e Mo o laser não consegue gatilhar a descarga em arco.

Este trabalho de iniciação científica propôs-se a substituir o laser de CO₂ por um circuito gerador de pulso em alta tensão (~15kV) com duração de ~50μs, implementado com sucesso por Geoffrey C. Watt e Peter G. Evans[1].

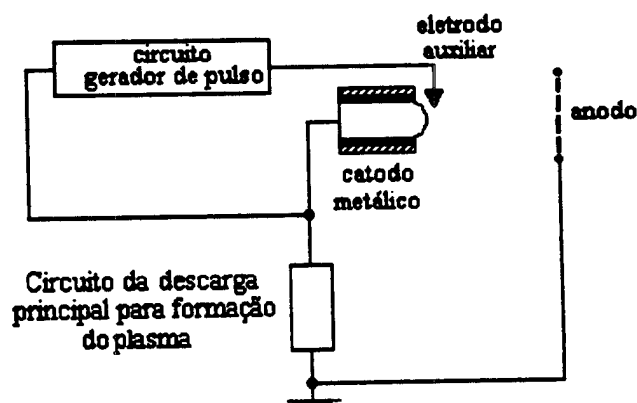


Figura 1 - Esquema para substituição do laser de CO₂ no chaveamento da descarga em arco na PCEN

Os resultados dos ensaios do circuito para diversas tensões contínuas de alimentação do circuito gerador de pulso são mostrados abaixo. Devido às limitações da ponta de prova utilizada, não foi possível testar o circuito com os níveis de tensão desejados (~15kV), contudo resultados satisfatórios foram obtidos para tensões de até 12,5kV. Os gráficos das formas de onda

obtidas e da extrapolação estão expostos nas figuras 2 e 3, respectivamente:

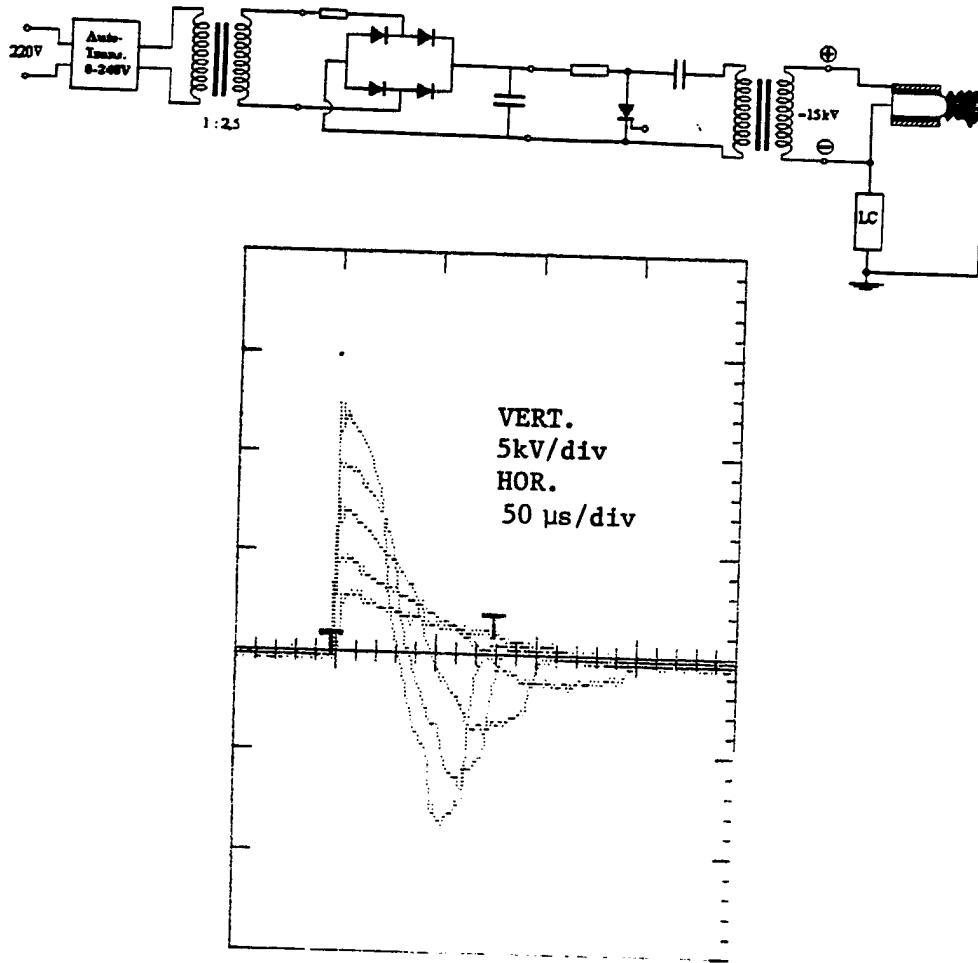


Figura 2 - Esquema do Circuito e saídas do circuito gerador de pulso para entradas contínuas de 100, 200, 300, 400 e 500V

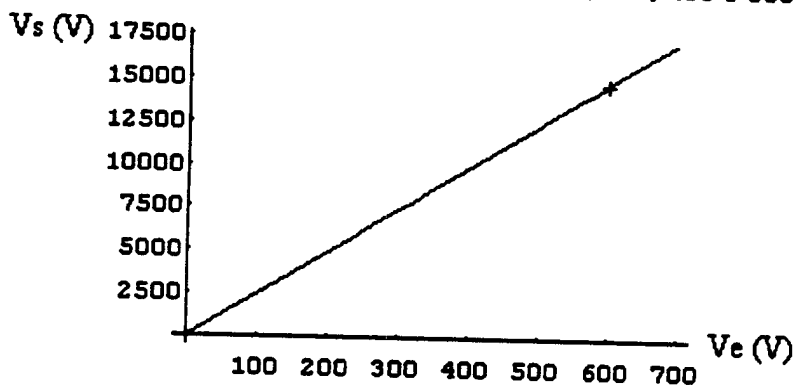


Figura 3 - Gráfico da Extrapolação da tensão de pico do Circuito Gerador de Pulso da PCEN elaborado no software Mathematica

[1] G.C. Watt P.G. Evans, "A Trigger Power Supply for Vacuum Arc Ion Source", IEEE Trans.on Plasma Science, vol. 21, pp.547-551, october 1993.

GERAÇÃO DE PLASMAS METÁLICOS NO EXPERIMENTO PCEN

**RELATÓRIO FINAL
AGOSTO/96-AGOSTO/97**

**BOLSISTA : CLÊNIO RICARDO DA FONSÊCA SOBREIRA
ALUNO DO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
ORIENTADOR : RENATO SÉRGIO DALLAQUA**

SUMÁRIO

Introdução	3
Centrífuga de plasma iniciada por arco vácuo	3
Descarga em arco no vácuo	5
Desenvolvimento do Circuito Elétrico para o chaveamento da descarga em arco na PCEN	9
Conclusão	11

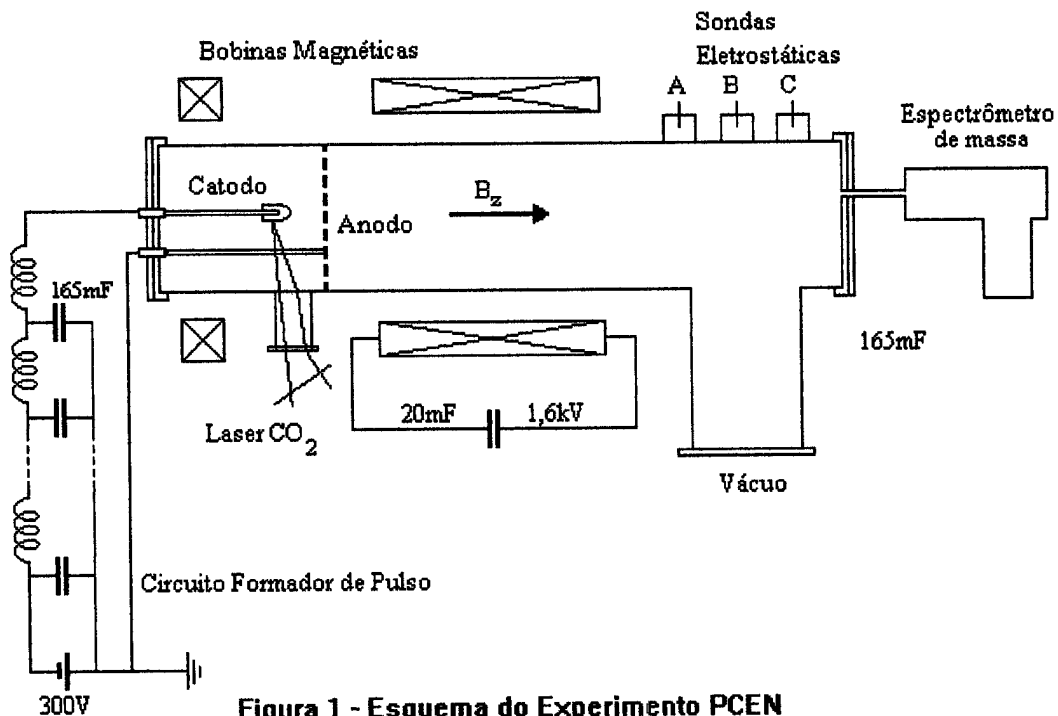
INTRODUÇÃO

As medidas realizadas até o presente momento no Laboratório Associado de Plasma (LAP) no experimento PCEN tem demonstrado que os parâmetros do plasma dependem fortemente das propriedades termofísicas dos catodos metálicos utilizados. No entanto, devido à limitação experimental imposta pelo chaveamento da descarga em arco, a análise está limitada a uma pequena variedade de catodos metálicos. O trabalho agora em andamento tem como objetivo estender o estudo para todos os elementos metálicos da tabela periódica. A modificação a ser realizada no experimento para que este objetivo seja atingido ficará evidente com a descrição do experimento PCEN que é dada a seguir.

CENTRÍFUGA DE PLASMA INICIADA POR ARCO VÁCUO

Desde 1982 vem sendo desenvolvida no LAP uma centrífuga de plasma tendo como objetivo o estudo de plasmas em rotação e sua possível aplicação à separação de isótopos estáveis. Atualmente há um crescimento no uso de isótopos em áreas tais como: energia nuclear, agricultura, medicina nuclear, ciências biomédicas, química, física nuclear e etc. Com relação à geração de energia, utiliza-se o isótopo urânio-235 enriquecido a 2-3% com consumo de centenas a milhares de toneladas por ano. Como exemplo, uma usina nuclear de 1000MW (6,6TWh/ano, aproximadamente a energia consumida em Paris em um ano), consumirá 27 toneladas de urânio (2-3% de enriquecimento, reator PWR) ou 160 toneladas de urânio natural. Difusão gasosa e centrífuga mecânica (ou gasosa) são os métodos comercialmente usados para a obtenção do urânio-235 enriquecido. De particular interesse são as pesquisas em medicina nuclear e ciências biomédicas com a utilização de isótopos estáveis, onde o desenvolvimento de um tratamento ou medicamento de uso corrente terá um grande retorno social e financeiro. Havendo um crescimento no consumo de isótopos estáveis ocorrerá uma procura a novos métodos de separação isotópica de custos mais baixos e este é um dos objetivos do experimento PCEN.

A Figura 1 mostra o esquema da centrífuga de plasma iniciada por arco no vácuo, PCEN, desenvolvida no INPE em seu estágio atual. A descrição deste experimento é como segue. Uma câmara de aço inoxidável de



comprimento 1,05m e 0,22m de diâmetro é evacuada a uma pressão de 1×10^{-4} Pa por uma bomba difusora. Dentro deste câmara e numa das extremidades estão o catodo, polarizado por um circuito formador de pulso a uma tensão típica no intervalo 60-200V, e o anodo que é uma grade de tungstênio aterrada colocada a $\sim 0,05$ m do catodo. O catodo, constituído de metal ou liga metálica, fornece material para a formação do plasma. As bobinas magnéticas produzem um campo magnético pulsado na direção axial com valor máximo de 1,0T, mas experimentalmente verifica-se uma melhor operação do experimento com valores entre 0,1-0,2T. Para se fechar o circuito entre o catodo e o anodo utiliza-se a radiação ($10,6\mu\text{m}$) proveniente de laser de CO_2 pulsado de 30MW. O pulso de corrente (tipicamente 1-3kA) gerado por essa descarga em arco tem uma duração de ~ 16 ms sendo 14ms praticamente constante. O pulso de corrente é obtido quando o campo magnético é máximo. A interação entre a corrente de plasma e o campo magnético guia esta coluna até a outra extremidade. Lá serão feitas as medidas do fator de enriquecimento e dos vários parâmetros do plasma por sensores apropriados.

Até a presente data, plasmas metálicos de C, Mg, Zn,, Ca e Pb tem sido obtidos facilmente. No entanto plasmas de Al, Ti, Ni e Cu tem sido obtidos marginalmente, isto é, há uma porcentagem alta de falha no chaveamento da descarga em arco. A energia do laser está no limiar para a formação do plasma que fechará a descarga principal para esses catodos. Para metais de ponto de fusão

elevados como Zr, Ta, W, Mo o laser não consegue gatilhar a descarga em arco. Muitos resultados experimentais e teóricos tem sido obtidos neste experimento .

O trabalho desenvolvido nesta primeira fase consistiu em substituir o laser por um circuito elétrico para o chaveamento da descarga. O circuito elétrico (H.V.) produzirá um pulso de alta tensão ($\sim 10-15\text{kV}$) com corrente de saída de até 50A e duração $\tau \sim 50\mu\text{s}$. Este circuito polarizará um eletrodo auxiliar bem próximo ao catodo (distância $d < 1\text{mm}$). Ao ser acionado este circuito, ocorrerá uma pequena descarga em arco entre o eletrodo auxiliar e o catodo metálico. A expansão desse pequeno plasma criará um meio condutor entre o catodo e o anodo fechando assim a descarga em arco entre eles (descarga da energia armazenada no circuito formador de pulso). O esquema para tal chaveamento está na figura 2.

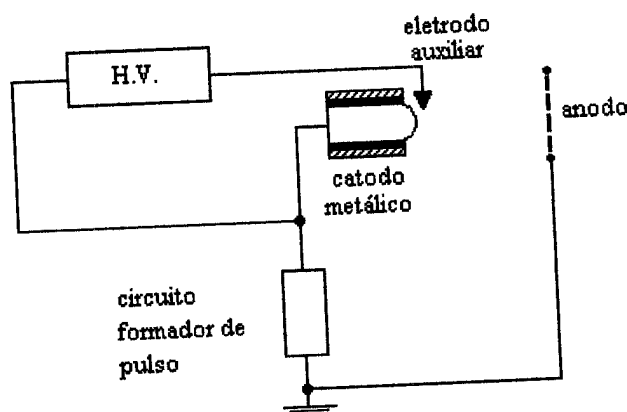


Figura 2 - Esquema para substituição do laser de CO_2 no chaveamento da descarga em arco na PCEN

Esta nova configuração permitirá a obtenção de plasmas metálicos de toda a tabela periódica.

DESCARGA EM ARCO NO VÁCUO

O termo descarga em arco no vácuo é um paradoxo em si, pois, se há arco não há vácuo e se há vácuo não há arco. Por descarga em arco no vácuo entende-se: um arco sustentado unicamente pelo material originado dos eletrodos (catodo e anodo) num meio que é o vácuo. Dentro desta categoria de arco, o interesse é pelo arco difuso, no qual todo material tem origem no catodo, ou seja, o anodo é passivo. Isto coloca um limite na corrente de arco (I_a) que para anodo de tungstênio é $I_a < 10\text{kA}$. No caso da PCEN, este critério é plenamente satisfeito, pois $I_a \sim 1-3\text{kA}$.

Embora a descarga em arco seja estudada a mais de um século, até o presente momento não existe uma descrição teórica satisfatória para explicar os vários fenômenos que ocorrem numa descarga

fenômenos que ocorrem na superfície do catodo e no plasma adjacente a essa superfície. Como foi dito, não há no momento nenhum modelo que descreva completamente todos os complexos fenômenos que estão ocorrendo e os modelos existentes tem gerado muita controvérsia e levado a tão distintas previsões dos parâmetros.

Visto em mais detalhes, Figura 3b, tem-se os seguintes fluxos de partículas numa descarga em arco : Γ_{ec} é o fluxo de elétrons emitidos pelo catodo; Γ_v é o fluxo de vapor metálico emitido pelo catodo; Γ_{mp} é o fluxo de macropartículas emitido pelo catodo (diâmetro das macropartículas $\sim 1\mu\text{m}$). Na região 2 (Figura 3b, próximo ao catodo) são gerados os íons da ionização do vapor metálico pelos elétrons. Íons e elétrons atingem o anodo com correntes I_i e I_e respectivamente resultando na corrente de arco $I_a = I_i + I_e$.

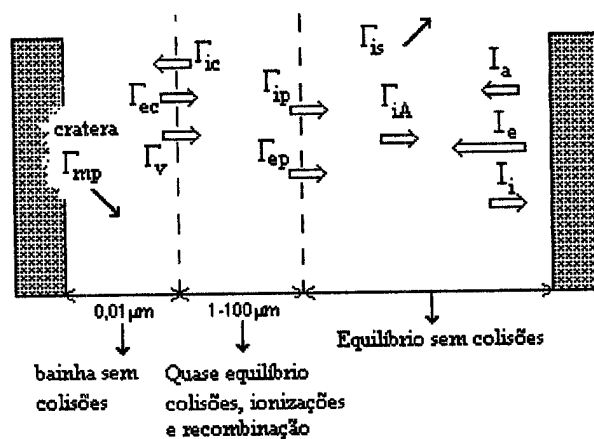


Figura 3b - Descrição esquemática da descarga em arco no vácuo

As seguintes características da descarga em arco no vácuo são relevantes para as aplicações a que estão voltadas o experimento PCEN, isto é, a separação de isótopos estáveis e a deposição de filmes finos metálicos :

- A tensão de arco, isto é, a diferença de potencial entre o catodo e o anodo que mantém a descarga é baixa. Depende da natureza do catodo, sua geometria, corrente de arco, campo magnético axial, etc. O valor dessa tensão de arco está no intervalo 10-100V.
- A taxa de erosão (quantidade de massa que emana do catodo durante o pulso de plasma) depende da natureza do catodo, geometria, campo magnético e corrente de arco. O objetivo é maximizar essa taxa o que levaria a obtenção de um plasma de alta densidade.
- A corrente de íons I_i é cerca de 10% da corrente total fluindo na descarga. Este tipo de descarga constitui portanto uma rica fonte de íons.

- Os íons se dirigem para o anodo, contrário ao campo elétrico. Os íons são gerados próximos ao catodo (Fig. 3b) e por algum mecanismo ainda não esclarecido ganham energia suficiente para vencer o campo elétrico. Já foram detectados íons com energia entre 10-150eV . Possuem também cargas múltiplas e já foram encontrados íons com carga até +5C.
- O plasma gerado tem alta densidade (10^{19} - 10^{21} m⁻³), temperatura T~1-5eV e é altamente ionizado.

CIRCUITO ELÉTRICO PARA O CHAVEAMENTO DA DESCARGA EM ARCO NA PCEN

Existem várias opções de circuito elétrico para o chaveamento da descarga em arco no vácuo. Foi escolhida uma forma simples que oferece confiabilidade tanto do ponto de vista dos componentes eletrônicos como no seu funcionamento. A Figura 4 mostra o esquema simplificado do circuito e sua operação é dada a seguir. Uma fonte de tensão V_{DC} carrega um capacitor C através do resistor R_c . Ao ser acionado o SCR, o capacitor se descarrega através do primário do transformador T (relação de espiras 1: N) surgindo então uma tensão $V_{DC} \times N$ nos terminais do secundário.

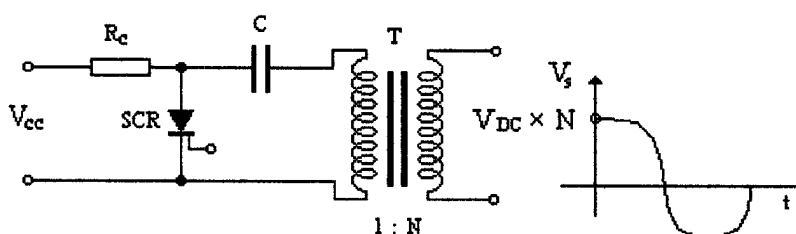


Figura 4 - Esquema do circuito para o chaveamento da descarga em arco na PCEN em substituição do laser de CO₂

A primeira etapa do projeto foi a construção de fonte de tensão contínua regulável de 0 a 1000V para a alimentação do circuito acima. Como o circuito não exige um ripple (variações de tensão na saída) muito pequeno, escolheu-se o retificador de onda completa com filtro a capacitor. Este tipo de retificador permite aproveitar melhor a potência do transformador. O seu esquema pode ser visto detalhadamente na figura 11 (anexo). O transformador T₂ possui uma relação de aproximadamente 1:2.7 e eleva a tensão da rede de 220V para 600V. Introduzindo o filtro a capacitor eletrolítico conseguimos tensões contínuas aumentadas de um fator $\sqrt{2}$ em relação ao valor RMS

na saída do trafo [4]. Por fim, resistência r (ver figura 11) tem por função conter o pico de corrente no momento em que o circuito é ligado pois nessa ocasião o capacitor funciona como um curto.

O circuito mostrado na figura 4 pode ser modelado matematicamente por um oscilador RLC onde R seria a soma das resistências dos fios, do SCR e do enrolamento primário do transformador, L a indutância do primário e C a capacitância total do circuito. No caso do ensaio a vazio, assumindo um perfeito acoplamento entre os enrolamentos, o transformador pode ser considerado uma simples indutância no circuito primário (L_{mag}). Já no caso em que o circuito opera no chaveamento em arco, observou-se experimentalmente que a voltagem de condução catodo-eletrodo é da ordem de 100V, muito menor que a disponível em circuito aberto. Para analisar esse caso, é justificável trocar o circuito aberto por um curto circuito [1]. O período então será diretamente dependente da indutância de escape L_L (da ordem de $8\mu\text{H}$) em lugar da indutância principal do enrolamento L_{mag} ($\sim 160\mu\text{H}$). Com base neste modelo, ilustrado na figura 5, faremos a dedução dos principais parâmetros do circuito.

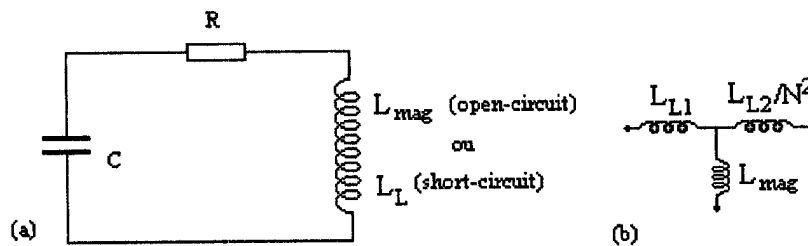


Figura 5 - (a) Modelo de descrição para o circuito a vazio ou curto-circuitado. (b) Circuito equivalente do transformador

Aplicando a Lei de Kirchoff para a malha acima, obtém-se: $V_c = V_r + V_L$ (1)

Sabe-se também que $i = -C \frac{dV_c}{dt}$; $V_L = L \frac{di}{dt}$ e $V_r = R i$ (2)

Introduzindo as equações (2) em (1) tem-se: $\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{LC} V_c = 0$ (3)

Para sistemas físicos de segunda ordem são definidos dois parâmetros que caracterizam completamente o circuito [2]. São eles:

- ω_n - Frequência de oscilação natural do circuito
- ξ - Amortecimento do sistema

A equação diferencial em termos desses parâmetros é :

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + 2 \xi \omega_n \frac{dV_c}{dt} + \omega_n^2 V_c = 0 \quad (4)$$

Da equação (4) deduz-se que $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ e $\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ (5)

A solução da equação diferencial (4) é da forma

$$V_c(t) = C_1 e^{(-\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1})t} + C_2 e^{(-\xi\omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1})t} \quad (6)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes. A montagem do circuito foi feita de forma que $0 < \xi \ll 1$, para tanto, basta utilizar fios de baixa resistência e escolher um SCR também de resistência desprezível. Vale lembrar que é importante ter uma baixa relação C/L (ver equação (5)). Nessas condições $V_c(t)$ pode ser reescrita na forma :

$$V_c(t) = K_1 \exp(-\xi\omega_n t) \cos(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + K_2 \exp(-\xi\omega_n t) \sin(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \quad (7)$$

Aplicando a condição inicial $V_c(0) = V_{DC}$ e $V_c'(0) = 0$ tem-se

$$V_c(t) = V_{DC} \exp(-\xi\omega_n t) \cos(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \quad (8)$$

O período desse sinal pode ser agora facilmente obtido :

$$\frac{2\pi}{T} = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \Rightarrow \text{Como } \xi \ll 1 \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{LC} \quad (9)$$

Como o que nos interessa é apenas o primeiro pulso definimos

$$\tau_p = T/2 = \pi \sqrt{LC} \quad (10)$$

Derivando a equação (8) e aplicando na primeira equação de (2) obtém-se

$$i(t) = C V_{DC} \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \exp(-\xi\omega_n t) \sin(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) - C V_{DC} \xi \omega_n \exp(-\xi\omega_n t) \cos(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \quad (11)$$

Desprezando novamente ξ em relação à unidade ($\xi \approx 0$), tem-se que o valor máximo da corrente será aproximadamente:

$$i_{\text{máx}} = C V_{\text{DC}} \omega_n = C V_{\text{DC}} \frac{1}{\sqrt{LC}} = V_{\text{DC}} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (12)$$

Assim, temos em (10) e (12) dois parâmetros cruciais para o chaveamento da descarga em arco: a largura do pulso e a corrente do primário. O transformador T (fig. 4) foi projetado para operar de maneira aproximadamente linear na faixa de operação $V_{\text{DC}} = 0-1000\text{V}$, em outras palavras, teremos relações lineares entre $I_{\text{primário}}$ e $I_{\text{secundário}}$, bem como entre $V_{\text{primário}}$ e $V_{\text{secundário}}$. Resumidamente, tem-se as seguintes relações entre V_{DC} , N , C e L :

- Tensão de saída : $V_s = V_{\text{DC}} \times N$
- Corrente no primário (pico) : $I_p = V_{\text{DC}} \sqrt{\frac{C}{L}}$
- Corrente no secundário : $I_s = I_p / N$
- Período de pulso de tensão : $\tau_p = \pi \sqrt{LC}$

No caso da PCEN, os valores desejados são:

- Tensão de saída : $V_s = 10 - 15\text{kV}$
- Corrente de saída: $I_s = 10 - 50\text{A}$
- Período de pulso de tensão : $\tau_p \leq 50 \mu\text{s}$

Tomando os valores $V_{\text{DC}} = 600\text{V}$, $N = 25$, $C = 20\mu\text{F}$ e $L = 8\mu\text{H}$ tem-se : $V_s \sim 15\text{kV}$, $\tau_p \sim 40 \mu\text{s}$ $I_p = 950 \text{ A}$, $I_s = 38 \text{ A}$. Utilizando os valores acima, fez-se uma simulação do circuito no programa PSPICE (Versão 5.4). O transformador foi modelado por uma fonte de tensão controlada, com um fator multiplicativo de 25, cuja tensão de entrada é igual à tensão sobre o indutor. Em substituição ao SCR, cuja função é chavear a descarga do capacitor sobre o primário do transformador, utilizou-se dois switches. O primeiro é “switch-open” que abre depois $10\mu\text{s}$ e sua função é apenas alimentar o capacitor com uma tensão de 600V . Este tempo poderia ser arbitrariamente menor uma vez que a fonte e o capacitor são ideais e por isso a alimentação se dá quase instantaneamente. O segundo switch (tipo switch-close) fecha no instante $t = 15\mu\text{s}$ e viabiliza a descarga da energia armazenada no capacitor sobre o transformador. O resistor $R = 0.8\Omega$ simula a resistência total do circuito que é igual a $R_{\text{SCR}} + R_{\text{fios}} + R_{\text{primário}}$. Os resultados obtidos foram muito próximos aos obtidos em laboratório e a simulação mostrou-se um modo alternativo de estimar a resistência do SCR (R_{SCR}) uma vez que R_{fios} e $R_{\text{primário}}$ podem ser determinados. Os resultados são mostrados abaixo bem como o arquivo de entrada no editor SCHEMATICS do PSPICE :

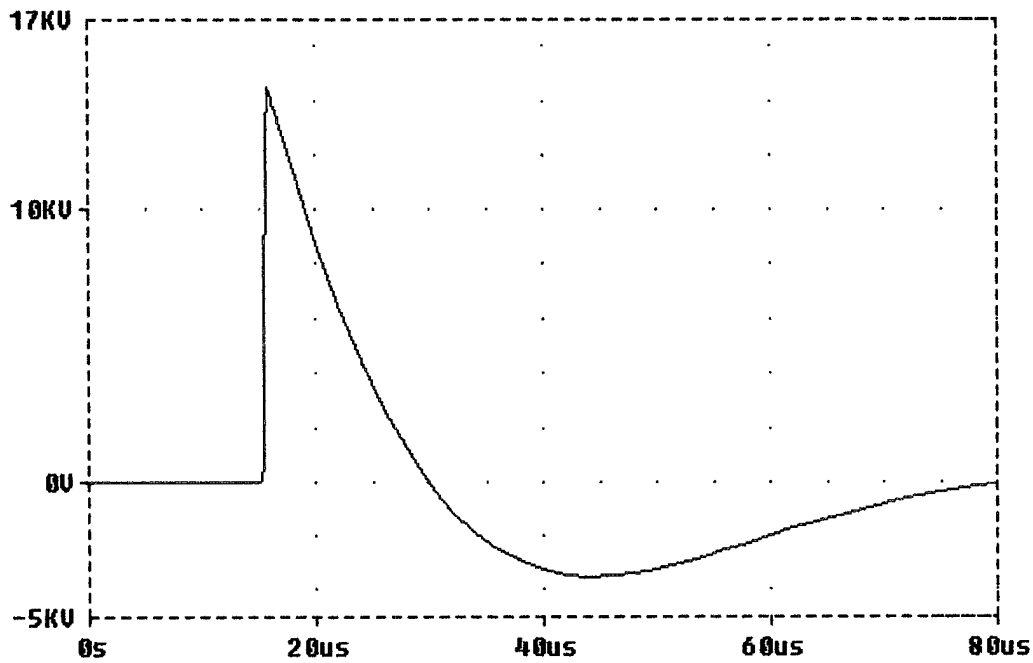


Figura 6 - Simulação da tensão de saída do Circuito Gerador de Pulso no programa PSPICE para entrada contínua de 600V

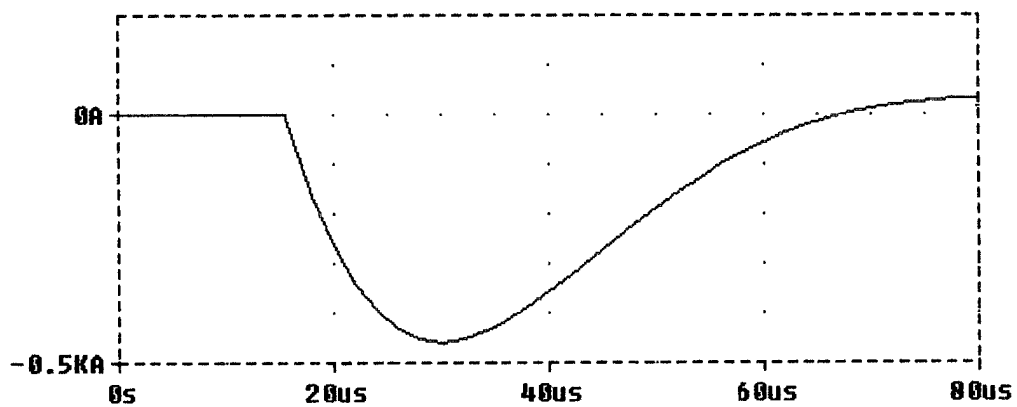


Figura 7 - Simulação da Corrente de Primário do Circuito Gerador de Pulso no programa PSPICE para entrada contínua de 600V

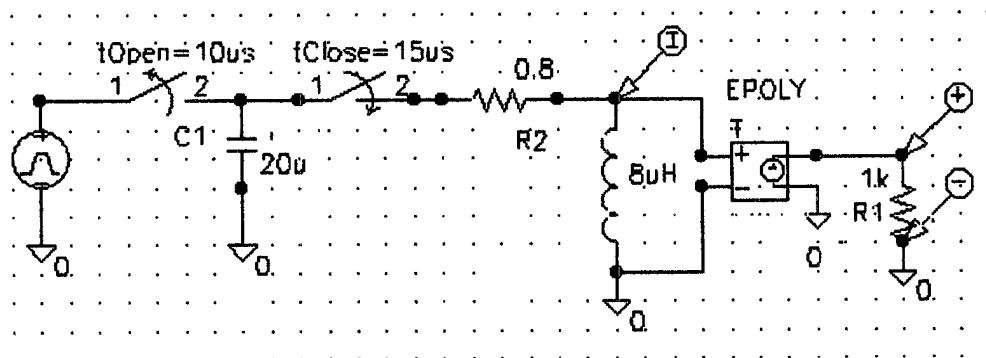


Figura 8 - Arquivo de entrada no editor SCHEMATICS do PSPICE

O ponto crítico neste tipo de circuito é o transformador. Deve-se manter alta isolamento entre o primário e o secundário. Também o enrolamento deve ser feito de tal maneira a minimizar as perdas. O material do núcleo do transformador deve ter alta densidade de fluxo de saturação [3] e por isso torna-se necessário o emprego do aço silicioso em substituição à ferrite. Experiências realizadas por Watt e Evans [1] comprovaram que as características do material do núcleo causam alterações na forma do pulso de saída.

Os resultados dos ensaios do circuito para diversas tensões contínuas de alimentação do circuito gerador de pulso são mostrados abaixo. Devido às limitações da ponta de prova utilizada, não foi possível testar o circuito com os níveis de tensão desejados (~15kV), contudo resultados satisfatórios foram obtidos para tensões de até 12,5kV. Os gráficos das formas de onda obtidas e da extrapolação estão expostos nas figuras 9 e 10, respectivamente:

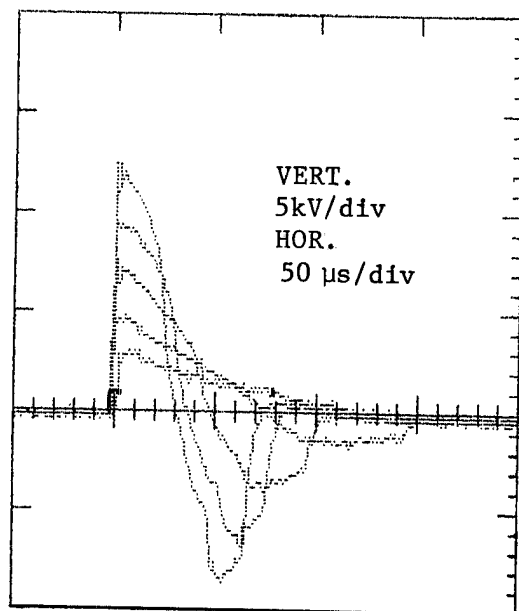


Figura 9 - Saídas do Circuito Gerador de Pulso para entradas contínuas de 125, 200, 300, 400 e 500V

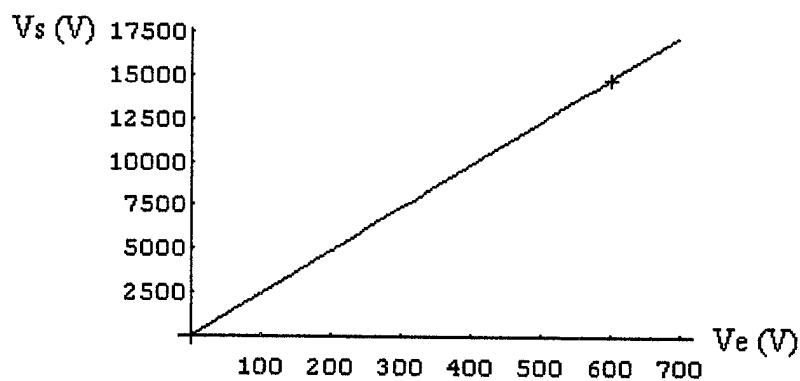


Figura 3 - Gráfico da Extrapolação da tensão de pico do Circuito Gerador de Pulso da PCEN elaborado no software Mathematica

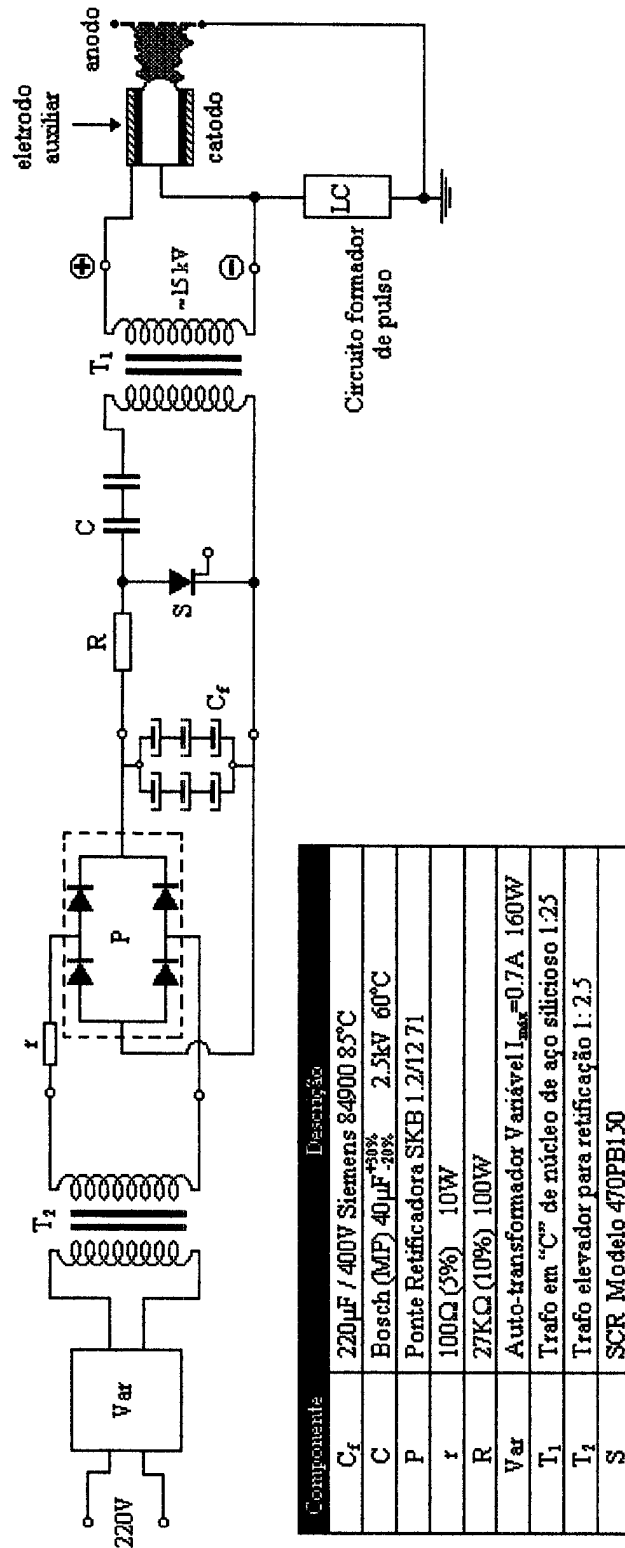


Figura 11 - Circuito completo para o chaveamento em arco na PCEN

CONCLUSÃO

O circuito desenvolvido apresentou as características necessárias para chavear a descarga em arco no vácuo em substituição a um laser de CO₂ até então utilizado no experimento. Abre-se assim, a possibilidade de obtenção de uma grande variedade de plasmas metálicos sob as mais variadas condições experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] G.C. Watt, P.G. Evans, "A Trigger Power Supply for Vacuum Arc Ion Source", IEEE Trans.on Plasma Science, vol. 21, pp.547-551, october 1993.
- [2] Chua, O. L., Desoer, Charles A. & Kuh, Ernest S., " Linear and Nonlinear Circuits ",McGraw-Hill Internacional Editions, 1987.
- [3] Saraiva, Delcyr B., "Materiais Elétricos" , Guanabara Dois, 1983.
- [4] Cipelli, Antônio Marco V. & Sandrini, João W., "Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Cicuitos Eletrônicos", 9ª. edição, Livros Érica Editora LTDA, 1982.

