

## OTIMIZAÇÃO DE FONTE DE DESCARGA DC PULSADA PARA ESTUDOS DE NUCLEAÇÃO DE FILMES DE DLC

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

Giovanna de Souza Giuliani Barbosa (INPE, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [giovannaetep2007@yahoo.com.br](mailto:giovannaetep2007@yahoo.com.br)

Vladimir Jesus Trava-Airoldi (LAS/INPE, Orientador)  
E-mail: [vladimir@las.inpe.br](mailto:vladimir@las.inpe.br)

COLABORADORES  
Luís Francisco Bonetti (CVD Vale)  
Valerie C. Corcuera (LAS/CTE/INPE)

Julho/2012

## 1. Resumo

Neste trabalho iniciado em agosto de 2011, foram feitas buscas intensas sobre as várias formas de deposição de DLC (*diamond-like carbon*) pulsada e geração de plasmas e os parâmetros de obtenção do filme de DLC, diamante tipo carbono com e sem nano partículas de diamantes em substratos metálicos.

Estes materiais possuem excelentes propriedades tais como dureza, alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, biocompatibilidade, inércia química, baixa rugosidade, transparência óptica, alta resistividade elétrica entre outras, fazendo com que o DLC tenha uma variedade de aplicações. Entretanto, sabe-se que o DLC possui fraca adesão sobre substratos metálicos, o que resulta em delaminações.

Nesse relatório final, além de estudos sobre fontes especiais de descarga, está sendo desenvolvida e projetada uma válvula pulsada para ser acoplada ao reator para deposição de filmes e se ter controle preciso do fluxo de diferentes precursores de crescimento dos filmes de DLC, especialmente os que precisam ser injetados no reator na forma líquida. Conforme orientação recebida, foram pesquisados os vários tipos de bico de injeção eletrônica MPFI de carros para acréscimo ao projeto da válvula, dentre os quais escolheu-se o modelo IWM52300 do fabricante Magneti Marelli. Inicialmente, foi feito um protótipo no “protoboard” para trabalhar o tempo de abertura da válvula (bico ejetor) para permitir a entrada de gases e/ou líquidos no reator. Depois foram projetados “*drives*” de frequência e de potência numa placa de circuito impresso com seus devidos componentes, de acordo com o que foi elaborado no protótipo.

Até o momento estamos projetando uma fonte de 0 a 15 V para ser agregada neste projeto, com o intuito de fornecer a alimentação elétrica na tensão adequada ao circuito.

## 2. Introdução Teórica

### 2.1 DLC

O nome DLC vem do Inglês – Diamond-like Carbon e por suas propriedades e constituição serem muito próximas das do diamante, principalmente, a dureza, resistência ao desgaste, alta resistência elétrica, transparência óptica e baixo coeficiente de atrito [1].

### 2.2 Modificações de superfícies por plasma

A modificação de superfície de materiais, especialmente os metálicos, requer estudos aprofundados de parâmetros de obtenção desta modificação associada ao processo de deposição do filme de DLC propriamente dito. Para tanto, além de compreender bem os mecanismos envolvidos nestes processos, os quais envolvem descargas elétricas, ou seja, a formação de plasmas com os gases precursores é necessário, também, um bom entendimento dos processos e parâmetros envolvidos em modificação de superfície e em crescimento de filmes de DLC [1].

O plasma é um dos estados físicos da matéria, similar ao gás, no qual certa porção das partículas está ionizada; é um gás formado por íons positivamente carregados e elétrons. Em cada átomo de um gás neutro, o número de elétrons que orbitam ao redor do núcleo é igual ao número de prótons que se encontram no núcleo [2]. Portanto a perda de um ou mais elétrons causa a ionização destes átomos. Dentro de uma escala de volume macroscópica, o plasma é semi-neutro, ou seja, o número de cargas negativas é igual ao número de cargas positivas [3]. A ionização ocorre e o estado ionizado se sustenta porque o gás encontra-se muito quente, pois as colisões entre os átomos são suficientemente intensas para que os elétrons sejam arrancados dos mesmos. É muito rarefeito, de maneira que os elétrons, uma vez removidos, dificilmente encontrarão um íon com o qual possam se recombinar. Para que o plasma ocorra, é necessário que o gás está sujeito a fontes externas de energia, tais como campos elétricos intensos ou radiações capazes de arrancar os elétrons dos átomos.

O plasma também é chamado de “quarto estado da matéria”. Os plasmas possuem todas as propriedades dinâmicas dos fluidos, como, por exemplo, turbulências. Como são formados de partículas carregadas livres, plasmas conduzem eletricidade. Eles tanto geram como sofrem a ação de campos eletromagnéticos, levando ao que se chama de efeito coletivo. Isto significa que o movimento de cada uma das partículas carregadas é influenciado pelo movimento de todas as demais. O comportamento coletivo é um conceito fundamental para a definição do plasma [4].

Com eletrodos ou par de eletrodos dentro de uma câmara de descarga, aplicando uma tensão DC (corrente alternada) ou RF (radiofrequência), elétrons primários e secundários são gerados pela própria descarga e através de bombardeamento de íons no catodo (pólo polarizado negativamente) e acelerados em direção ao anodo (pólo positivo). No caminho que percorrem, causam excitação e mais ionização. O átomo usado para crescer o filme é acelerado em direção ao alvo (catodo), e através de uma reação em cadeia, pode, também, ocorrer o efeito chamado de “sputtering” que é ocorre a ejeção de átomos do alvo. Por outro lado, esses átomos ionizados podem crescer um filme diretamente no catodo quando da colisão [5].

### **2.3 Fonte**

O trabalho proposto da fonte pede o estudo de retificadores trifásicos. O retificador é um conversor de potência que converte tensão alternada em sua entrada (CA), para tensão contínua em sua saída (CC). Tecnicamente, trata-se de um conversor CA-CC [5].

Além disso, na vida diária deparamos com dispositivos físicos de dois estados tais como interruptores, contatos, diodos, transistores e outros. Dependendo do dispositivo em questão, ele pode controlar os estados ligado/desligado, baixo potencial/alto potencial. Vários circuitos podem ser formados com esses dispositivos, tais como computadores eletrônicos, sistema de chaveamento telefônico e, no caso deste projeto, fontes de alta tensão.

Em um circuito elétrico, uma chave é um dispositivo ligado a um ponto do circuito e pode tomar um dos dois estados, fechado ou aberto. No estado fechado,

a chave permite que a corrente passe através do ponto, enquanto que no estado aberto nenhuma corrente passa através do ponto [6].

Um [transformador](#) de corrente (abreviadamente TC ou TI) é um dispositivo que reproduz, no seu circuito secundário, a corrente que circula em um enrolamento primário com sua posição vetorial substancialmente mantida, em uma proporção definida, conhecida e adequada. Os transformadores de corrente, também chamados de transformadores de instrumentos, utilizados em aplicações de alta tensão (situações essas onde circulam, frequentemente, altas correntes), fornecem correntes suficientemente reduzidas e isoladas do circuito primário de forma a possibilitar o seu uso por equipamentos de medição, controle e proteção.

São classificados de acordo com o modelo do enrolamento primário, já que o enrolamento secundário é constituído por uma bobina com derivações (*taps*) ou múltiplas bobinas ligadas em série e/ou paralelo, para se obter diferentes relações de transformação. Quanto aos tipos construtivos, os TCs mais comuns, são:

- **Tipo enrolado** - este tipo é usado quando são requeridas relações de transformações inferiores a 200/5. Possui isolação limitada e portanto, se aplica em circuitos até 15 kV. Ocorre quando o enrolamento primário, constituído de uma ou mais espiras, envolve mecanicamente o núcleo do transformador.
- **Tipo barra** - transformador de corrente cujo enrolamento primário é constituído por uma barra, montada permanentemente através do núcleo do transformador.
- **Tipo bucha** - consiste de um núcleo em forma de anel (núcleo toroidal), com enrolamentos secundários. O núcleo fica situado ao redor de uma “bucha” de isolamento, através da qual passa um condutor, que substituirá o enrolamento primário. Este tipo de TC é comumente encontrado no interior das “buchas” de disjuntores, transformadores, religadores, etc..
- **Tipo janela** - tem construção similar ao tipo bucha, sendo que o meio isolante entre o primário e o secundário é o ar. O enrolamento primário é o próprio condutor do circuito, que passa por dentro da janela.

- **Tipo núcleo dividido** - transformador de corrente tipo janela em que parte do núcleo é separável ou basculante, para facilitar o enlaçamento do condutor primário.
- **Tipo com vários enrolamentos primários** - Transformador de corrente com vários enrolamentos primários distintos e isolados separadamente.
- **Tipo com vários núcleos** - transformador de corrente com vários enrolamentos secundários isolados separadamente e montados cada um em seu próprio núcleo, formando um conjunto com um único enrolamento primário, cujas espiras (ou espira) enlaçam todos os secundários [7].

Nos últimos 20 anos, uma variedade de circuitos integrados dedicados ao controle de fontes chaveadas foi desenvolvida. Os controladores que operam no modo tensão (controlando o valor médio da tensão de saída) ainda dominam o mercado, embora diversos permitam operação no modo corrente (controlando a corrente sobre o elemento indutivo do circuito). O método de controle mais utilizado é o de Modulação por Largura de Pulso, embora existam circuitos que operam com Modulação em Frequência.

Alguns CIs possuem apenas uma saída, enquanto outros fornecem duas saídas deslocadas de 180° elétricos entre si. Além disso, a maioria possui um amplificador de erro e uma referência interna, permitindo a implementação da malha de controle. As características específicas de cada CI variam em função da aplicação, do grau de desempenho esperado, das proteções implementadas, etc. Em linhas gerais pode-se dizer que os atuais CIs possuem:

- sinal MLP linear, com ciclo de trabalho de 0 a 100%;
- amplificador de erro integrado;
- referência de tensão integrada;
- tempo morto ajustável;
- inibição por subtensão;
- elevada corrente de saída no acionador (100 a 200mA);
- "soft start";
- limitação digital de corrente;
- capacidade de sincronização com outros osciladores.

O IGBT é frequentemente utilizado como uma chave, alternando os estados de condução (On-state) e corte (Of-state) aos quais são controlados pela tensão de porta, assim como em um *MOSFET*.

Se aplicarmos uma pequena tensão de porta positiva em relação ao emissor, a junção  $J_1$  ficará reversamente polarizada e nenhuma corrente irá circular através dessa junção. No entanto, a aplicação de uma tensão positiva no terminal de porta fará com que se forme um campo elétrico na região de óxido de silício responsável pela repulsão das lacunas pertencentes ao substrato tipo P e a atração de elétrons livres desse mesmo substrato para a região imediatamente abaixo da porta.

Enquanto não houver condução de corrente na região abaixo dos terminais de porta, não haverá condução de corrente entre o emissor e o coletor porque a junção  $J_2$  estará reversamente polarizada, bloqueando a corrente. A única corrente que poderá fluir entre o coletor e o emissor será a corrente de escape (leakage).

Uma característica desta região de operação é a tensão direta de breakdown, determinada pela tensão breakdown da junção  $J_2$ . Este é um fator extremamente importante, em particular para dispositivos de potência onde grandes tensões e correntes estão envolvidas. A tensão de breakdown da junção  $J_2$  é dependente da porção mais fracamente dopada da junção, isto é, a camada N- isto se deve ao fato de que a camada fracamente dopada resulta em uma região de depleção desta junção mais larga. Uma região de depleção mais larga implica em um valor máximo de campo elétrico na região de depleção que o dispositivo poderá suportar sem entrar em breakdown mais baixo, o que implica no fato de que o dispositivo poderá suportar altas tensões na região de corte. Esta é a razão pela qual a região N- da região de arrastamento é mais levemente dopada que a região tipo P da região de corpo (Body). Os dispositivos práticos geralmente são projetados para possuírem uma tensão de breakdown entre 600 V e 1200 V.

Ao aplicarmos uma tensão entre porta e emissor do dispositivo, fazendo a porta possuir uma tensão positiva com relação ao emissor, uma corrente de pequena intensidade e de curta duração circula pela porta de forma a carregar a

capacitância parasita que existe entre a porta e a porção semicondutora logo abaixo do terminal de porta. Como já foi dito, a tensão faz com que um campo elétrico apareça entre o terminal de porta e a porção de semicondutor **p** logo abaixo da porta. Este campo elétrico atrai alguns elétrons livres da própria região tipo **p** e alguns elétrons livres das porções **n+** localizadas dentro desse substrato **p**, em virtude do fato de essa região estar fortemente dopada. Ao aumentarmos a tensão entre a porta e o emissor, conseqüentemente, aumentaremos esses campos elétricos e mais portadores negativos serão atraídos para a região imediatamente abaixo do terminal de porta.

Quando a tensão entre a porta e o emissor atinge um determinado valor limite que dependa do dispositivo conhecida como tensão de limiar (threshold voltage), simbolizada por  $V_{th}$ , a quantidade de elétrons livres acelerados pelo campo elétrico é tão grande que a região imediatamente abaixo da porta acaba por se transformar do tipo **p** para o tipo **n**, fenômeno conhecido como inversão sendo a camada que sofreu o processo recebe o nome de camada de inversão, mais comumente conhecida como canal.

Com a formação deste canal, temos uma ligação do tipo **n** entre a pequena região **n+** e a região de arrastamento, tal canal permite a condução de corrente através de uma pequena região na junção J1 que estava reversamente polarizada antes de a tensão entre porta e emissor atingir o valor limiar. Dessa forma, elétrons serão transportados através deste canal até a região de arrastamento onde irão fazer parte da corrente que circula pela junção J3 que está diretamente polarizada, fazendo com que o “diodo” formado pela junção J3 entre em condução. Com este efeito, temos que a camada **p+** conectada ao coletor injeta lacunas positivamente carregadas na região de arrastamento **n-**.

Essa injeção de lacunas da região de arrastamento causa a modulação da condutividade da região de arrastamento onde as densidades de ambos os portadores, elétrons livres e lacunas atingem valores muito mais elevados que aquela que a região **n-** geralmente apresenta. É esta modulação de condutividade que dá ao IGBT sua baixa tensão de condução entre os terminais de coletor e emissor do IGBT por causa da reduzida resistência da região de arrastamento, isto se deve ao fato de que a condutividade de um material semicondutor é proporcional à densidade de portadores deste material. Assim, o IGBT poderá



drenar correntes elevadas com poucas perdas de potência, como o que ocorre em um transistor bipolar.

Algumas das lacunas injetadas na região **n-** são recombinadas nesta mesma região com os elétrons livres desta camada. No entanto, as maiores partes das lacunas que alcançam a região não se recombinam e alcançam a junção J2 que está reversamente polarizada. Assim, as lacunas encontram um campo elétrico favorável ao seu movimento, justamente por causa da polarização reversa da junção. Com este campo elétrico da junção J2, as lacunas serão arrastadas por meio da corrente de difusão pela região de arrastamento atravessando a junção J2 até serem coletadas pela região do tipo **p** onde está conectado o terminal de coletor [9].

### 3. Materiais e Métodos

Com o conhecimento adquirido de fontes especiais, onde larguras e amplitudes de pulso, bem como a frequência, partiu-se para o desenvolvimento de uma “fonte” pulsada, circuito, esse, para promover a abertura e fechamento de um bico injetor, de forma a se poder controlar o fluxo de gás e/ou líquido através de seu orifício.

Foram feitos testes de bancadas no circuito do bico injetor e cujos resultados estão descritos no item a seguir, onde esforços foram colocados em cima do desenvolvimento do circuito de bico injetor de maneira prioritária.

Materiais usados para montagem manual dos drives de frequência e de potência:

- CI 89C2051;
- Resistores: 8,2 k Ohms, 2.2k Ohms, 470 Ohms, 500 Ohms, 2Kk Ohms, 10 k Ohms, 1 k Ohms;
- Cristal de 12000;
- Capacitor cerâmico de 33p Farady;
- Leds amarelo, branco e vermelho;
- Transistor BC327 , BC 337 e IRF 630;
- Bico injetor M PFI Magnetti Marelli IWM52300 injetor de combustível.

Além da montagem de um circuito preliminar de bancada para dar início aos testes de abertura e fechamento de um bico injetor, acredito que neste ponto do trabalho, todo o conhecimento de literatura sobre fontes especiais, deu subsídio importante para a construção deste primeiro circuito de controle, conforme descreve-se no item abaixo.

#### 4. Resultados e discussões

A foto, mostrada na Fig. 1 contém o circuito feito no “*protoboard*” no laboratório da Empresa CVD Vale. Através dele calculamos a frequência e Potência de resposta.



**Figura 1. Circuito de teste**

Os equipamentos mostrados nas figuras 2 e 3 são utilizados na Empresa CVD Vale como a Fonte de testes em bancadas e o osciloscópio, usado para encontrar as frequências. Podendo ser mudados conforme solicitados em pesquisas.

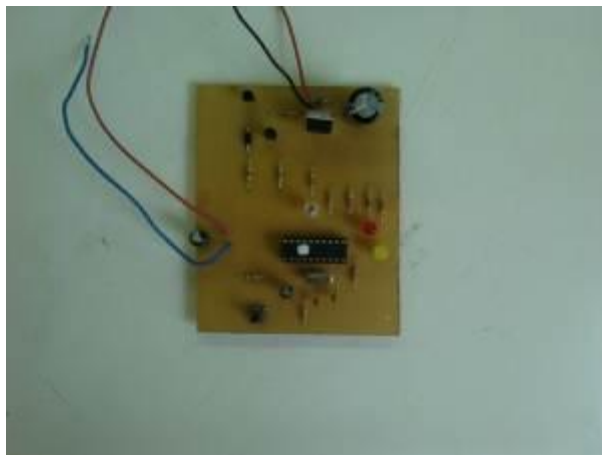


**Figura 2. Fonte de teste.**



**Figura 3. Osciloscópio de teste**

Na Fig. 4 mostra-se o circuito já montado, testado e em fase de conclusão para ser acoplado no Reator para futuras pesquisas de crescimento de filmes de DLC que venham utilizar o processo de injeção de gás ou líquido de forma pulsada. Deve-se acrescentar que as formas de pulsos, em termos de largura, distância e frequência serão objetos de intensos estudos que se seguirão.



**Figura 4. Placa do Circuito Impresso**

Na Fig. 5 mostra-se um bico injetor MPFI normalmente utilizados nos carros e será usado em nosso *circuito de frequência e potência para assim que necessário injetar gases ou líquidos em futuras pesquisas no INPE.*



• **Figura 5. Bico de injeção eletrônica**

O Bico injetor Conforme dados informados pelo fabricante Magneti Marelli tem pressão máxima de operação de 450 kPa, tensão mínima de 6V e 14V no máximo

- Corrente mínima e máxima de 0,5 e 2,5 A

- Tempo de abertura de 1,6 ms (milissegundos).

Os resultados obtidos até o momento foram satisfatórios. Com os resultados das frequências de abertura a cada 3 segundos no led branco, a cada 30 segundos no led vermelho e a cada 60 segundos no led amarelo; que corresponde aos tempos que o bico leva para ser acionado. Desta forma foi caracterizada esta primeira fase de testes do sistema de controle de abertura e fechamento do bico injetor.

## 5. Conclusão

Este primeiro relatório é parte muito importante de meu aprendizado, pois foi possível aprender e desenvolver uma importante busca bibliográfica dentro dos padrões hoje exigidos. Mas acima de tudo o aprendizado de sistemas eletrônicos mais complexos e a prática laboratorial a que me foi dada a oportunidade de participar certamente foi a parte mais importante neste início de atividade científica estar em contato.

Quanto aos resultados, de respostas do circuito propriamente dito, posso afirmar que teremos muito a aprender e desenvolver observou-se que para resultados preliminares, essas frequências poderão ser adequadas para o bom desempenho do bico injetor nesta fase muito inicial, pois somente através da escolha do melhor tempo de resposta do bico é que vamos buscar novas e melhores condições de operação da válvula pulsada que requisitos para se obterem resultados mais objetivos em cada projeto a serem discutidos e pesquisados no INPE.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] ROBERTSON J. *Material Science and Engineeringr ELSEVIER* 37 (2002) 129-281
- [2] CALLISTER WILLIAM D. *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING* New York,NY,1991.

- [3] [pt.wikipedia.org/wiki/Física\\_de\\_Plasmas](http://pt.wikipedia.org/wiki/Física_de_Plasmas)
- [4] [WWW.medio.com.br](http://WWW.medio.com.br)
- [5] [WWW.cp.com.br/upl/artigo\\_13.pdf](http://WWW.cp.com.br/upl/artigo_13.pdf)
- [6] [WWW3.di.ufpb.br/Jose/sistemas.doc](http://WWW3.di.ufpb.br/Jose/sistemas.doc)
- [7] *BOYLESTAD ROBERT L.N. DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS 1998*
- [8] <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>
- [9] [WWW.gta.ufrj.br/grad/01\\_1/igtb/Pagina\\_IGBT](http://WWW.gta.ufrj.br/grad/01_1/igtb/Pagina_IGBT)