

## Desenvolvimento de sistemas de plasmas de interesse tecnológico<sup>1</sup>

### *Development of plasma systems of technological interest*

Matheus Ribeiro Damasceno<sup>2</sup>

Ettore Pureza Leonel Bigi de Aquino<sup>3</sup>

Júlio Akashi Hernandez<sup>4</sup>

DOI: <https://doi.org/10.34019/2179-3700.2019.v19.29883>

#### Resumo

Pulsos rápidos de alta tensão, com tempo de subida na ordem de nanossegundos (ns), têm se mostrado cada vez mais aplicáveis nas mais diversas áreas de pesquisa, desde o tratamento de superfícies em ciência dos materiais até aplicações na biotecnologia e na biomedicina. Nosso estudo foi particularmente motivado pela capacidade que esses pulsos têm de acionar plasmas frios de barreira dielétrica, uma tecnologia em franco desenvolvimento e com grande leque de aplicações. Foi feita uma revisão na bibliografia especializada, incluindo a reprodução de alguns circuitos apresentados na literatura capazes de gerar pulsos usando componentes semicondutores como chaves rápidas. Particularmente interessante para nosso trabalho é o modo avalanche de transistores, e acionamento avalanche em cascata de transistores em série.

**Palavras-chave:** Plasma DBD. Pulsos rápidos. Alta tensão. Efeito avalanche. Biotecnologia.

#### Abstract

Fast high-voltage pulses with a rise time in the order of nanoseconds have proven increasingly applicable in a wide range of research areas, from surface treatment in materials science to applications in biotechnology and biomedicine. Our study was particularly motivated by the ability of these pulses to trigger cold dielectric barrier plasmas, a rapidly developing technology with a wide range of applications. A review of the specialized literature was performed, including the reproduction of some circuits presented in the literature capable of generating pulses using semiconductor components as quick keys. Particularly interesting for our work is the avalanche mode of transistors, and cascade avalanche activation of transistors in series.

**Keywords:** DBD plasma. Fast pulses. High voltage. Avalanche effect. Biotechnology.

## 1 INTRODUÇÃO

Gases parcialmente ou totalmente ionizados podem ser chamados de plasma, segundo alguns critérios mais específicos, mas com comportamento distinto de gases neutros (BITTENCOURT, 2004, Cap. 1). As maneiras mais usuais de se gerar plasmas

---

<sup>1</sup> Trabalho premiado no Seminário de Iniciação Científica da UFJF em 2016.

<sup>2</sup> Bolsista do programa BIC/UFJF. [matheus.ribeiro@engenharia.ufjf.br](mailto:matheus.ribeiro@engenharia.ufjf.br).

<sup>3</sup> Bolsista do programa BIC/UFJF. [ettore.aquino@engenharia.ufjf.br](mailto:ettore.aquino@engenharia.ufjf.br).

<sup>4</sup> Departamento de Física – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, CEP 36036-900. [jahernandes@gmail.com](mailto:jahernandes@gmail.com).

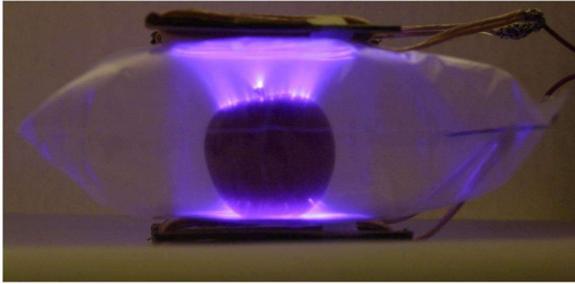
são através de descargas elétricas em gases, ou simplesmente por aquecimento. Os plasmas também podem ser classificados pela sua temperatura, em que plasmas quentes correspondem a temperaturas encontradas na superfície e no núcleo de estrelas, e plasmas frios são plasmas desde a temperatura ambiente, aproximadamente, até algumas centenas de graus Celsius. Neste trabalho, exploramos uma forma de se gerar plasmas frios através de descargas em barreira dielétrica (do inglês *dielectric barrier discharge plasmas*, ou plasmas DBD), à temperatura e pressão ambientes.

Plasmas frios podem ser entendidos como um modelo simplificado no tratamento teórico de plasmas, em que o transporte de calor em plasmas é considerado aproximadamente nulo. São considerados apenas o transporte de massa e de momento linear, além das interações eletromagnéticas e gravitacionais do plasma (BITTENCOURT, 2004, Sect. 8.6). Os plasmas frios atmosféricos podem ser caracterizados por alguns valores técnicos de referência:

- Temperatura do gás é aproximadamente a temperatura atmosférica,  $T_{\text{gás}} \approx 300 \text{ K}$
- Temperatura dos elétrons, à temperatura ambiente, corresponde a  $T_e \approx 10^5 \text{ K}$
- A concentração de moléculas do gás é da ordem de  $N_{\text{gás}} = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
- A concentração de elétrons livres é relativamente baixa,  $N_e = 10^8 \text{ a } 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
- A pressão atmosférica é aproximadamente a pressão ambiente,  $P_{\text{atm}} \approx 760 \text{ Torr}$  ou  $100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ atm}$
- A temperatura dos íons, presentes no plasma, têm a mesma temperatura do gás, ou seja, temperatura ambiente:  $T_e \gg T_{\text{íon}} = T_{\text{gás}}$
- Em geral, são fracamente ionizados, correspondendo a  $< 1\%$ .

A grande vantagem de se utilizar plasmas atmosféricos é que sua aplicação requer menor preparação de ambientes especiais (em geral, seria necessária uma câmara de baixa pressão para aplicação de plasmas). Veja a *Figura 1* para um exemplo na inativação de microorganismos na superfície de alimentos dentro de sua própria embalagem, potencialmente dobrando a vida útil de frutas e vegetais.

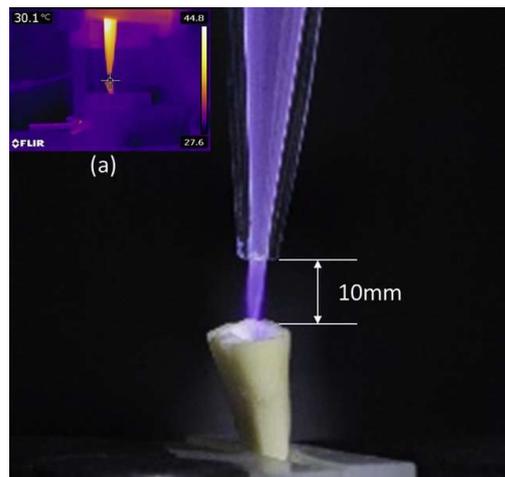
Figura 1 – Tratamento de alimentos (eliminação de patógenos)



Fonte: ASTLEY, 2011.

Outros exemplos de utilização de plasmas atmosféricos estão nos tratamentos biomédicos de seres vivos, principalmente de pacientes humanos, que devem ser feitos preferencialmente em temperatura e pressão ambientes. Na *Figura 2*, temos a aplicação de um jato de plasma frio em um tratamento de canal *in vitro*.

Figura 2 – Aplicação biomédica no tratamento de dente



Fonte: LI, 2013.

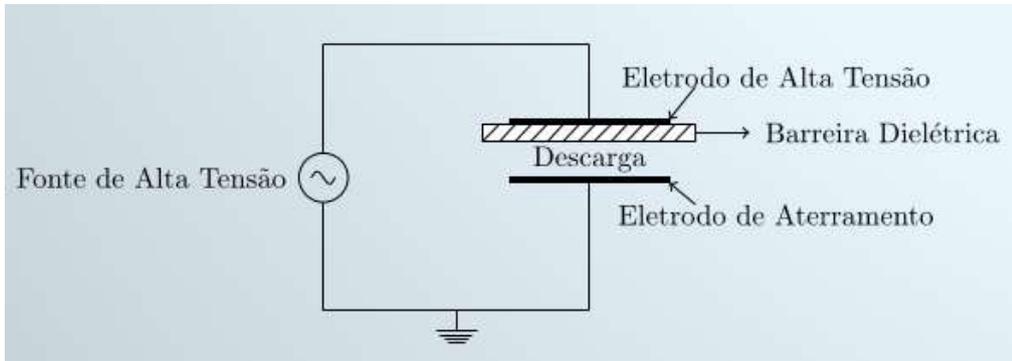
Neste trabalho, tivemos como objetivos investigar os mecanismos de geração de plasmas frios especificamente aqueles caracterizados como de “barreira dielétrica” (DBD); efetuar uma revisão bibliográfica de circuitos eletrônicos que geram os pulsos elétricos necessários à produção de plasma DBD; testar alguns dos circuitos candidatos a gerar o plasma com as características desejadas; efetuar a renovação (*retrofit*) de uma fonte de alta tensão pulsada valvulada, usando componentes eletrônicos menores, com um

circuito mais compacto.

## 2 PLASMAS DBD

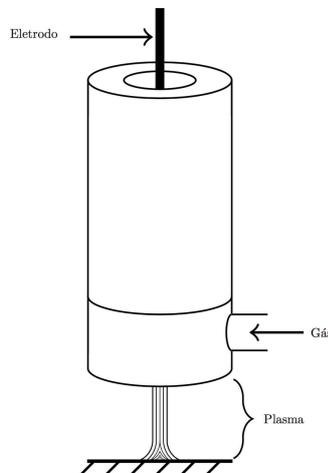
Plasmas frios obtidos de descargas em barreira dielétrica (ou plasmas DBD) podem ser obtidos através da produção de pulsos rápidos de alta tensão em um circuito aberto em dois eletrodos, em que se utiliza uma barreira dielétrica, ou seja, um isolante, entre os eletrodos. Uma configuração bastante geral está mostrada na *Figura 3*.

Figura 3 – Configuração básica para geração de plasma DBD



Fonte: autores.

Figura 4 – Esquema do reator de plasma DBD atmosférico, do Laboratório de Plasmas da UFJF. O eletrodo é submetido a alta tensão, e o plasma é produzido na parte inferior no gás, isolado eletricamente do eletrodo



Fonte: autores.

A parte elétrica/eletrônica que gera os pulsos rápidos de alta tensão no sistema atual funciona com uma válvula de alta tensão, mostrada na *Figura 5*. Esta válvula suporta facilmente tensões da ordem de 5 a 10 kV, com tempo de resposta menor que 50 ns. Estas características são essenciais para a geração do plasma DBD no reator. Um dos objetivos do nosso trabalho foi estudar componentes eletrônicos mais compactos (MOSFETs) que pudessem substituir o funcionamento da válvula (BAKER e POCHA, 1990).

Figura 5 – Válvula de alta tensão e tempo de resposta rápida (<50 ns)



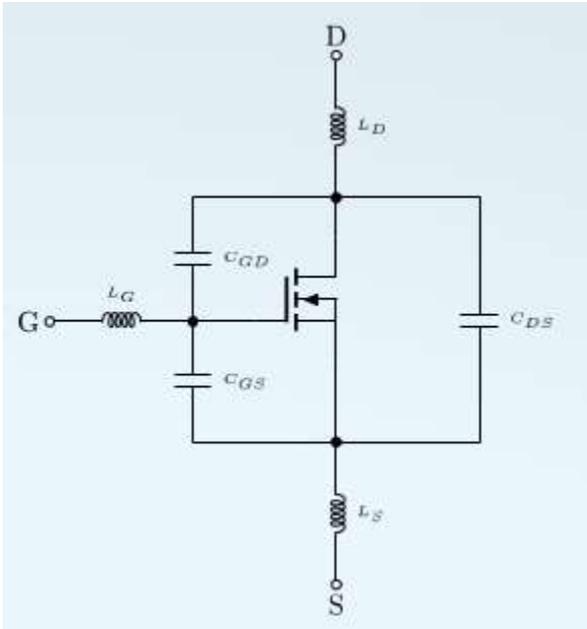
Fonte: autores.

### 3 CHAVE SEMICONDUTORA DE ALTA TENSÃO

A escolha de uma chave semicondutora deve levar em conta uma série de fatores técnicos como, por exemplo, a frequência de chaveamento à que será submetida, a potência que deve ser entregue a uma carga, a capacidade de dissipar potência, entre outras (BALIGA, 2010). Tendo em vista a tensão à qual as chaves serão submetidas e a característica de chaveamento ultra rápido (<50 ns), abordaremos aqui apenas os MOSFETs, principalmente aqueles capazes de suportar tensões de bloqueio superiores a 1 kV com capacidade de operar dentro da largura temporal esperada para o pulso. Pulsos aplicados em G invariavelmente irão interagir com as reatâncias e capacitâncias

representadas na *Figura 6*; quanto mais rápido o pulso, mais relevante passam a ser esses efeitos.

Figura 6 – Modelo de MOSFETs a parâmetros distribuídos



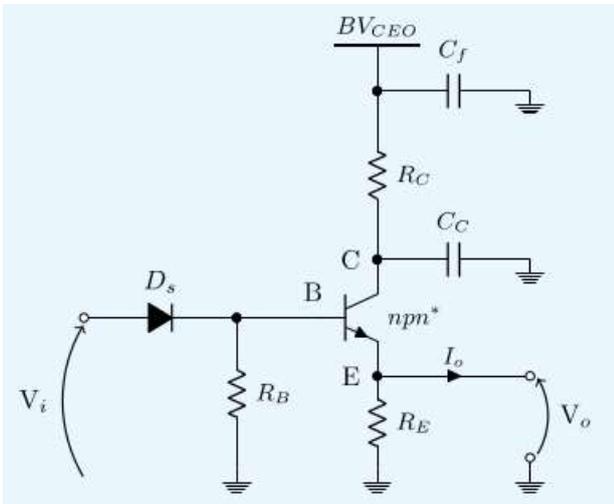
#### 4 EFEITO AVALANCHE

Estudamos o efeito da ruptura por avalanche de elétrons, como forma de geração de pulsos rápidos de nanossegundos. Este efeito foi relatado por McKay (1954), em semicondutores, e por Miller e Ebers (1955), em transistores.

Segundo Kilpelä e Kostamovaara (1997), quando um transistor NPN em modo avalanche se encontra na região de corte, surge uma grande tensão reversa entre os terminais do coletor e da base. A região de depleção entre o coletor e a base acaba então sendo empurrada fortemente para o interior da base, reduzindo sua largura efetiva. A avalanche propriamente dita se inicia assim que um pulso de corrente atinge o terminal da base, resultando em uma grande injeção de elétrons vindos do emissor. Com a região de depleção reduzida, os elétrons são varridos muito rapidamente da base para o coletor, onde chegam com energia suficiente para iniciar um processo ionização por avalanche na entrada dessa junção. O campo elétrico forte polariza reversamente a junção base-coletor dando energia cinética suficiente para os portadores minoritários de carga (lacunas no caso do transistor NPN) produzirem novos pares elétron-lacuna por ionização. O processo resulta em um intenso pulso de corrente, que acaba fluindo entre o coletor e o emissor.

Vamos nos concentrar no transistor de avalanche operando como chave, uma topologia típica para este tipo de operação é apresentada na *Figura 7*.

Figura 7 – Exemplo de topologia com transistor npn\* para modo avalanche



Fonte: autores.

Não estamos interessados na análise qualitativa de circuitos RC, algo bastante explorado durante os cursos de engenharia elétrica e física, por isso vamos nos concentrar em avaliar simulações utilizando o software *LTSpice* para guiar a escolha de valores comerciais para o resistor e para os capacitores envolvidos no circuito.

Os parâmetros que devemos avaliar a fim de investigar o comportamento deste circuito são: a corrente  $I_{RC}$ , a potência dissipada pelo resistor  $P_{RC}$ , o tempo de subida de  $V_C$ , denotado aqui por  $t_r$ , e a frequência máxima de carregamento calculada através de  $1/t_r$ .

O menor tempo de carregamento, e conseqüentemente maior frequência, é obtido na utilização dos menores valores possíveis para o resistor e o capacitor. No entanto, a potência dissipada pelo resistor deve ser observada a fim de assegurar a melhor escolha do componente adotado. Além disso, a melhor combinação pode assegurar que o circuito não seja sobredimensionado para operar em frequências em que o transistor jamais será submetido.

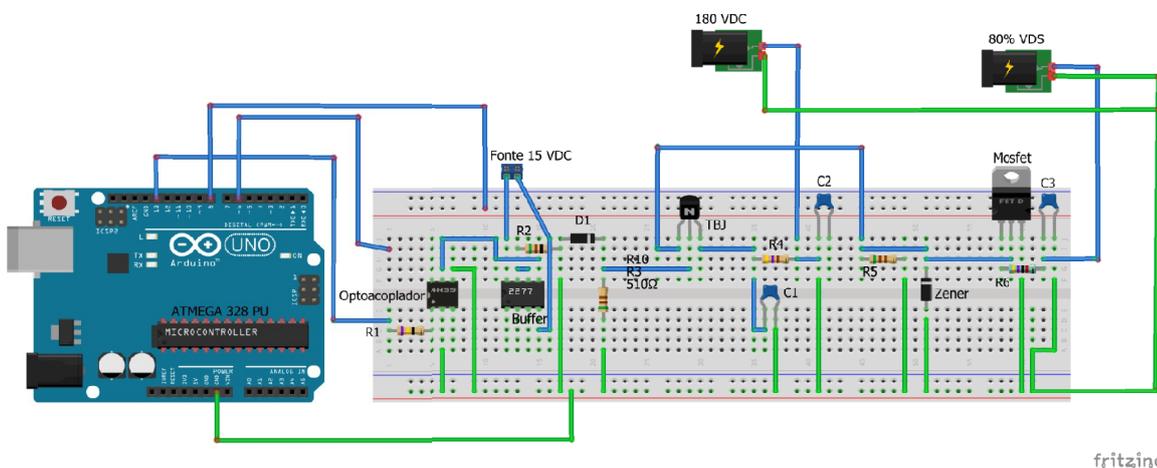
## 5 MICROCONTROLE

O sistema de geração de plasma DBD é composto por transistores operando em

modo avalanche, utilizados para acionar MOSFETs com tensão de bloqueio superiores a 800 V. Todo o circuito, exceto o MOSFET, é usualmente chamado de circuito *driver*, pois se destina ao chaveamento do MOSFET. Para que o transistor operasse da forma desejada, foi utilizado a plataforma Arduino a partir de um microcontrolador ATMEGA 328-pu, para que um sinal de onda quadrada de 5 V e frequência superior a 1 kHz fosse aplicado na base do transistor. O algoritmo de geração de ondas quadradas com *duty-cycle* de 50% foi desenvolvido através da plataforma Arduino. É importante ressaltar também que, apesar da alta tensão necessária para que o reator gere o plasma, este circuito apresenta baixo consumo de energia elétrica, uma vez que é drenada baixa corrente da fonte e o tempo de duração dos pulsos são extremamente pequenos durante a descarga.

Mostramos na *Figura 8* o esquema elétrico da conexão da placa Arduino, que contém o microcontrolador ATMEGA 328-pu, ao MOSFET.

Figura 8 – Esquema elétrico da conexão do microcontrolador como gerador de pulsos de baixa tensão que funcionam como driver para o MOSFET



Fonte: autores.

## 6 CONCLUSÃO

A geração de plasmas frios envolve uma instrumentação eletroeletrônica de alta complexidade, proporcionando ao pesquisador envolvido na confecção das fontes o desenvolvimento de muitas aptidões relacionadas ao campo da eletrônica de potência.

Apesar do sistema proposto não ter sido confeccionado por completo, boa parte dos fundamentos teóricos envolvidos ficou bem consolidada, resultando em documentos e roteiros capazes de serem seguidos para o prosseguimento do projeto. Como se trata de um campo de pesquisa com uma intensa inserção no mercado tecnológico, a bibliografia na área é consideravelmente limitada, já que boa parte das pesquisas acaba culminando em produtos com altíssimo valor agregado. Esse mesmo fato representa uma grande oportunidade tanto no campo da pesquisa quanto econômica.

Ainda se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao domínio e compreensão dos mecanismos químicos, físicos e biológicos da interação entre o plasma frio com células, tecidos, órgãos, micro-organismos e materiais.

A perspectiva que se tem atualmente está na projeção de inovações tecnológicas como a resistência superior em materiais, materiais biologicamente compatíveis, aplicação do plasma em medicina, tratamento de resíduos industriais, combustão assistida a plasma, propulsão a plasma, dentre outras áreas de pesquisa e desenvolvimento as quais o plasma se demonstra otimizador de processos e materiais.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PIBIC/CNPq e ao BIC/PROPP/UFJF pelas bolsas de Iniciação Científica e a realização dos Seminários de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

ASTLEY, M. **Pathogen inactivating plasma can lead to double shelf-life – expert.**

Reportagem de FoodNavigator. Disponível em:

<https://www.foodnavigator.com/Article/2011/11/02/Pathogen-inactivating-plasma-can-lead-to-double-shelf-life-expert>, 2011. Acesso em: 27 nov. 2018.

BALIGA, B. J. Chap. 6: **GD-MOSFET Structure.** In: **BALIGA, B. J. Advanced Power MOSFET Concepts.** 11th Ed. Springer US, 2010.

BAKER, R. e POCHA, M. Nanosecond switching using power mosfets. **Review of Scientific Instruments**, v. 61, n. 8, p. 2211–2213, 1990.

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics.** 3rd Ed. New York: Springer, 2004.

KILPELÄ, A. e KOSTAMOVARA, J. Laser pulser for a time-of-flight laser radar. **Review of scientific instruments**, v. 68, n. 6, p. 2253–2258, 1997.

LI, Y. e outros. Treatment of oral pathogenic bacteria with non-thermal activated water as a new type mouthwash. In: **40thIEEE Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS)**, Junho de 2013, São Francisco, CA, USA. Anais do 40th ICOPS.

MCKAY, K. Avalanche breakdown in silicon. **Physical Review**, v. 94, n. 4, p. 877, 1954.

MILLER, S. L.; EBERS, J. Alloyed junction avalanche transistors. **Bell System Technical Journal**, v. 34, n. 5, p. 883–902, 1955.