

**ANDRÉ BIANCHI LARAIA**

**DISPOSITIVO DE MICRODESCARGAS EM GASES NA PRESSÃO ATMOSFÉRICA**

**ANDRÉ BIANCHI LARAIA**

**DISPOSITIVO DE MICRODESCARGAS EM GASES NA PRESSÃO  
ATMOSFÉRICA**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L318d | <p>Laraia, André Bianchi</p> <p>Dispositivo de microdescargas em gases na pressão atmosférica / André Bianchi Laraia – Guaratinguetá, 2015.</p> <p>43 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 34-35</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama</p> <p>1. Jato de plasma 2. Dispositivos fotoeletrônicos I. Título</p> <p>CDU 533.9</p> |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**André Bianchi Laraia**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

  
Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MILTON EIJI KAYAMA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA  
UNESP-FEG

**Dezembro de 2015**

## **DADOS CURRICULARES**

**ANDRÉ BIANCHI LARAIA**

|                   |                                                                                                                 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 12.11.1990 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP                                                                           |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Flávio Laraia<br>Maria Helena Aparecida Bianchi Laraia                                                          |
| <b>2006/2009</b>  | Curso Técnico em Mecatrônica – Escola Técnica Prof. Everardo Passos<br>ETEP – São José dos Campos               |
| <b>2011/2016</b>  | Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual<br>Paulista - UNESP - Campus de Guaratinguetá |

ao meu pai, por toda a confiança depositada em mim ao longo de todo este caminho que escolhi, sendo sempre minha referência, não só de profissional mas como de pessoa.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por uma vida maravilhosa, pela minha saúde física e espiritual, essenciais para meu desenvolvimento como pessoa,

à minha mãe, *Maria Helena Aparecida Bianchi Laraia*, meu pai, *Flávio Laraia*, minha irmã *Flávia Helena Bianchi Laraia* e toda minha família, por seu apoio incondicional,

ao meu orientador e amigo, *Prof. Dr. Milton Eiji Kayama* pelo apoio e aconselhamento ao longo destes quatro anos de trabalho,

aos meus colegas de trabalho no Laboratório de Plasma, *Lucas Silva*, *Pedro Yago Marquezini*, *Alan Wilson Figueira de Andrade*, *André Zangrandi* e *Diego Glauco Azarias Reis*, pela companhia e contribuição para realização deste trabalho,

aos meus amigos e companheiros de estudo, *César Vinícius Soares Guimarães*, *João Pedro de Oliveira Fernandes*, *Robson Diego de Oliveira*, *Carlos Augusto Marcondes*, *William de Paula Silva*, *Victor Polo*, *Fernando Tiago Ribeiro Anderson Sales*, por estarem presentes ao longo deste cinco anos nos bons e maus momentos,

aos funcionários do Campus de Guaratinguetá, em especial ao *José Benedito Galhardo* pela atenção, apoio e serviços prestados,

às comissões organizadoras dos XXVI e XXVII CIC, em especial à *Prof. Dra. Maria Odila Hilario Cioffi* e dos XXXV e XXXVI CBRAVIC, em especial ao *Prof. Dr. Rogério Pinto Mota* pela oportunidade de divulgação deste trabalho para a comunidade científica e a todos os colegas pesquisadores que tive a oportunidade de conhecer nestes eventos.

“Aqueles que sonham acordados têm consciência de mil coisas que escapam aos que apenas sonham adormecidos.”

*Edgar Allan Poe*

LARAIA, A. B. **Dispositivo de microdescargas em gases na pressão atmosférica**. 2015. 46 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um dispositivo eletro-mecânico de microdescargas, operando na condição ambiente de pressão e temperatura, capaz de produzir jatos de plasma com a finalidade de tratamento de superfícies. As descargas são produzidas através de um eletrodo tipo catodo oco no formato de agulha por onde flui gás hélio. A tensão aplicada no eletrodo é proveniente de um conversor de tensão chaveado AC/AC utilizando a topologia ponte completa. O conversor recebe tensão de alimentação da rede elétrica 110/220 VAC, 60 Hz e entrega na saída uma tensão de 1000 V pico-a-pico, quadrada, com frequência de 5 kHz a 40 kHz. A frequência de saída é definida por um sinal de controle fornecido por um gerador de sinais externo. O *setup* do equipamento conta com aquisições de tensão e corrente de saída e um fotodetector para medições fotoelétricas para a caracterização óptica do jato de plasma gerado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Jato de Plasma. Conversor de Tensão. Fotodetector.

LARAIA, A. B. **Microdischarges device for atmospherical pressure gases**. 2015. 46 p. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

This work describes the development of an electro-mechanical micro-discharges device operating at ambient condition of pressure and temperature, capable to produce plasma jets for surface finishing. The discharges are produced through a needle shape electrode hollow cathode type by which flows the helium gas. The voltage applied on the electrode is provided for an AC/AC switching voltage converter of full-bridge topology. The converter is energized by a power line of 110/220 VAC, 60 Hz and gives a 1000 V peak-to-peak from 5 kHz to 40 kHz square waveform output. The output frequency is defined by a control signal provided by an external signal generator. The equipment setup includes output acquisition of voltage and current and a photo-detector for photo-electrical measurements, which allows an optical characterization of the plasma jet.

**KEYWORDS:** Plasma Jet. Voltage Converter. Photodetector.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Conexão típica de um <i>driver</i> de chaveamento da família <i>IR21XX</i> .....                                                           | 20 |
| Figura 2.2 – Fotodiodo .....                                                                                                                            | 20 |
| Figura 3.1 – Diagrama de blocos do setup do dispositivo de microdescargas.....                                                                          | 22 |
| Figura 3.2 – Dispositivo de descarga.....                                                                                                               | 23 |
| Figura 3.3 – Configuração para tratamento de amostras .....                                                                                             | 24 |
| Figura 3.4 – Esquema elétrico do conversor de tensão .....                                                                                              | 25 |
| Figura 3.5 – (a) Protótipo do conversor de tensão; (b) Conversor de tensão desenvolvido ....                                                            | 26 |
| Figura 3.6 – Esquema elétrico do fotodetector.....                                                                                                      | 27 |
| Figura 3.7 – Equipamento fotodetector .....                                                                                                             | 27 |
| Figura 4.1 – Jato de plasma obtido com hélio .....                                                                                                      | 28 |
| Figura 4.2 – Sinal do LED ( $V_{LED}$ ) e sinal da saída do fotodetector ( $V_{OUT}$ ) .....                                                            | 29 |
| Figura 4.3 – Sinal de saída do transformador (central) e fotodetector<br>(inferior).....                                                                | 29 |
| Figura 4.4 – Saída do conversor chaveado sem <i>drivers</i> .....                                                                                       | 30 |
| Figura 4.5 – Saída do conversor chaveado com <i>drivers</i> .....                                                                                       | 31 |
| Figura 4.6 – (a) Medição de <i>dead time</i> sem <i>driver</i> de chaveamento; (b) Medição de <i>dead time</i><br>com <i>driver</i> de chaveamento..... | 31 |
| Figura 4.7 – Saída do conversor chaveado com <i>drivers</i> operando na tensão de trabalho .....                                                        | 32 |
| Figura 4.8 – <i>Dead time</i> do conversor chaveado operando na tensão de trabalho.....                                                                 | 33 |
| Figura 4.9 – Exemplo de comparação de ângulo de contato .....                                                                                           | 34 |
| Figura 4.10 – Influência da potência da descarga no ângulo de contato.....                                                                              | 34 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 – Comparativo entre os tipos de transistores de potência..... | 19 |
|--------------------------------------------------------------------------|----|

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                                   |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                                                 | 15 |
| 1.1      | OBJETIVOS                                                                                                         | 16 |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>                                                                                       | 17 |
| 2.1      | PLASMA                                                                                                            | 17 |
| 2.2      | CONVERSORES DE TENSÃO CHAVEADOS                                                                                   | 18 |
| 2.3      | <i>INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTORS (IGBT)</i>                                                                  | 18 |
| 2.4      | <i>DRIVERS</i> DE CHAVEAMENTO DA FAMÍLIA <i>IR21XX</i>                                                            | 19 |
| 2.5      | FOTODIODO                                                                                                         | 20 |
| <b>3</b> | <b>PARTE EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS</b>                                                                          | 22 |
| 3.1      | <i>SETUP</i> DO DISPOSITIVO DE MICRODESCARGAS                                                                     | 22 |
| 3.2      | DISPOSITIVO DE DESCARGA                                                                                           | 23 |
| 3.4      | CONVERSOR DE TENSÃO                                                                                               | 24 |
| 3.4      | FOTODETECTOR                                                                                                      | 26 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISE</b>                                                                                       | 28 |
| 4.1      | ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE DESCARGAS                                             | 28 |
| 4.2      | ENSAIOS UTILIZANDO AQUISIÇÃO FOTOELÉTRICA                                                                         | 28 |
| 4.3      | MEDIÇÕES DE TENSÃO NO PROTÓTIPO DA NOVA TOPOLOGIA DO CONVERSOR E COMPARAÇÕES COM A VERSÃO ANTERIOR DO DISPOSITIVO | 30 |
| 4.4      | MEDIÇÕES NO CONVERSOR PARA TESTES NA TENSÃO DE TRABALHO (ALTA TENSÃO)                                             | 32 |
| 4.5      | ENSAIOS DE ÂNGULO DE CONTATO                                                                                      | 33 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>                                                                                                 | 35 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                                                                | 36 |
|          | <b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b>                                                                                    | 37 |
|          | <b>APÊNDICE A – DEMAIS PUBLICAÇÕES DESTE TRABALHO</b>                                                             | 38 |
|          | <b>APÊNDICE B – DATASHEET IRG4PC40U</b>                                                                           | 39 |
|          | <b>APÊNDICE C – DATASHEET IR2104(S)</b>                                                                           | 40 |
|          | <b>APÊNDICE D – DATASHEET LM319</b>                                                                               | 41 |
|          | <b>APÊNDICE E – DATASHEET 2W10</b>                                                                                | 42 |
|          | <b>APÊNDICE F – DATASHEET 1UF4007</b>                                                                             | 43 |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| <b>APÊNDICE G – DATASHEET 1223 3C</b> ..... | <b>44</b> |
| <b>APÊNDICE H – DATASHEET AD8001</b> .....  | <b>45</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Plasmas de descargas gasosas a alta pressão têm grande aplicação em processos industriais, por exemplo, a solda MIG (Metal Inert Gas), solda TIG (Tungsten Inert Gas) e tochas de plasma para fornos siderúrgicos. Outros processos industriais, como recobrimento e tratamento de superfícies usam plasmas gerados a partir de gases a pressões bem abaixo da pressão atmosférica. O regime da descarga em alta pressão é conhecido como regime de arco e em baixa pressão, regime luminescente. O custo em produzir descargas em baixa pressão é muito alto, portanto considerável esforço vem sendo realizado pela comunidade científica em substituí-los por descargas em pressão ambiente (KOSTOV et al., 2009). O objeto deste projeto foi o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para operar em tal condição para ser utilizado para alterar as propriedades da superfície de materiais.

A pesquisa em descargas a alta pressão busca o regime de descarga luminescente ou mesmo descarga do tipo corona, fugindo do regime de arco. Do ponto de vista do controle do regime da descarga evita-se que ocorra uma transição do luminescente ao arco que tende a ocorrer naturalmente quando aumentamos a tensão entre os eletrodos da descarga (LI; TAO; YIN, 2009). Um tipo de descarga que possibilita este controle são as microdescargas que são produzidas por descargas com eletrodos com pequena dimensão. Elas podem ser criadas na configuração de eletrodos conhecida como catodo oco onde o catodo tem a forma cilíndrica de um pequeno copo e o anodo é posicionado na frente da abertura deste copo. Nesta configuração foi observada em alta pressão a formação de plasma com tensões de 600 V enquanto que em outras configurações isto ocorre a tensões acima de 4 kV. O catodo oco também aumenta a emissão catódica em até duas ordens de magnitude em relação ao catodo plano (SCHOENBACH et al., 1997).

Anteriormente, no Laboratório de Plasma e Processamento de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, havia sido desenvolvido o dispositivo do tipo catodo oco em um projeto de Iniciação Científica (LARAIA; KAYAMA; ANDRADE, 2014). O dispositivo agora possui uma nova geometria, que permite melhor apoio em superfície plana, melhor vedação contra vazamento de gás no sistema, maior resistência a temperatura e melhor confiabilidade no contato elétrico entre a fonte de alimentação e o dispositivo de catodo oco. A fonte de alimentação está sendo modificada utilizando uma nova arquitetura de circuitos elétricos e diferentes componentes, permitindo assim que tensões de saída maiores sejam atingidas com multiplicadores de tensão menores, reduzindo o custo de produção e

permitindo a operação com sinais de saída pulsados próximos a forma de onda quadrada. Outra vantagem da nova fonte é utilizar um gerador de funções externo para prover sinal de controle, permitindo assim que opere em diferentes frequências.

As medições elétricas no dispositivo foram feitas com medições da tensão aplicada e da corrente da descarga. A primeira medida com sonda de atenuação 1000X Tektronix P6015A e a segunda pela queda de tensão em um resistor. A emissão ótica do plasma foi analisada através de um fotodetector rápido desenvolvido também como parte deste trabalho, composto por um fotodiodo Hamamatsu 1223 3C e um amplificador de sinais de banda larga com amplificador operacional AD8001.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho propõe a construção e a caracterização de um dispositivo de microdescargas elétricas que opere na pressão atmosférica e a construção de um dispositivo que possibilite a análise ótica do plasma. O *setup* desenvolvido será utilizado para tratamentos de superfícies para pesquisas na área da ciência de materiais, caracterização de jatos de plasma para pesquisas no ramo da física de plasma e análise e aprimoramento de circuitos, principalmente de conversores de tensão, para pesquisas na área de engenharia elétrica e eletrônica.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 PLASMA

O plasma, ocasionalmente, é descrito como o “quarto estado da matéria”, todavia esta definição não é de toda correta, pois durante a passagem de um gás para o estado plasma não há mudança de fase bem definida, assim como existe nos demais estados. Desta forma o plasma pode ser considerado como um estado distinto da matéria, pois descreve uma grande variedade de substâncias neutras que contém um grande número de partículas livres (elétrons e íons) que interagem e exibem um comportamento coletivo em função das forças de Coulomb de longo alcance (BITTENCOURT, 1929).

Em laboratório, o plasma é obtido através da ionização de um gás. Para tanto pode-se aplicar um feixe de luz intenso concentrado em um pequeno volume para ionizar seu interior. Também se pode, como neste trabalho, provocar a ionização através de uma descarga elétrica, acelerando elétrons por um campo elétrico aplicado por uma fonte externa.

A fonte de tensão deve ser capaz de atingir a tensão de *breakdown* do gás o qual se deseja ionizar. O *breakdown* ou ruptura dielétrica de um gás é o fenômeno de transformação de um gás isolante em condutor de eletricidade (plasma) (PFENDER, 1978).

O plasma pode ser classificado quanto a diversas características. Inicialmente, pode-se classificá-lo quanto à pressão na qual ele é produzido. Plasmas produzidos em baixas pressões podem ser qualificados como ‘plasmas a vácuo’, enquanto plasmas em pressões próximas à da atmosfera são ‘plasmas atmosféricos’. Plasmas a vácuo possuem uma tensão de *breakdown* muito menor que os atmosféricos, desta forma podendo operar com fontes de tensão muito mais simples. Em contrapartida necessitam de câmaras de vácuo, bombas e compressores para atingirem pressões baixas, elevando o custo de *setup*. Atualmente, com o avanço da eletrônica de alta tensão, plasmas atmosféricos se tornaram uma alternativa viável e de menor custo, sendo utilizado em larga escala para tratamento de superfícies.

As descargas utilizadas para ionização do gás também podem ser classificadas em diferentes tipos. Os principais são: descarga por barreira dielétrica (DBD), descarga corona (C) e descarga luminescente em pressão atmosférica (DLPA). O tratamento de superfícies proposto neste trabalho utiliza descargas luminescentes geradas na extremidade do eletrodo como agente do tratamento, porém no interior do eletrodo são apresentadas descargas por barreira dielétrica.

## 2.2 CONVERSORES DE TENSÃO CHAVEADOS

Os conversores chaveados, segundo HART (2012), são circuitos eletrônicos que convertem diferentes níveis de tensão em níveis diferentes, maiores ou menores, e entregam uma saída regulada.

O conversor chaveado é um regulador não linear, que trabalha nas regiões de corte e saturação dos transistores, diminuindo a potência dissipada neste componente e, por conseguinte, aumentando a eficiência do sistema. Essa topologia de circuito é uma alternativa viável aos reguladores lineares, circuitos que utilizam transistores trabalhando na região de amplificação do componente, de forma que este aja como uma resistência variável que controla a corrente que flui pela carga e dissipando mais potência, o que diminui a eficiência do regulador.

A grande desvantagem dos reguladores chaveados se comparados aos lineares é a geração de harmônicos na saída devido à forma de onda não linear que o sistema entrega na saída. A utilização de filtros passa-baixa se faz necessária se esses ruídos influenciarem sistemas mais sensíveis operando próximos ao conversor.

Reguladores chaveados necessitam de um sinal de controle, em geral de potência desprezível, para que sejam cortados ou saturados os transistores que chaveiam o circuito. Esse controle pode utilizar uma realimentação proveniente da saída e um detector de erro, aumentando a regulação da tensão obtida na saída.

## 2.3 INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTORS (IGBT)

O IGBT é um componente híbrido entre um Bipolar *Junction Transistor* (BJT) e um Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), o tornando um ótimo componente para operar em dispositivos de chaveamento (STORR, 2015). O IGBT combina a alta impedância de entrada de *gate* dos transistores MOSFET e a baixa resistência de saturação da junção coletor-emissor dos transistores BJT.

É usado em larga escala em conversores de tensão por conseguir operar em uma alta frequência de chaveamento (os melhores modelos atingem até 150 kHz de chaveamento), possuem valores elevados para tensão de operação (modelos de 600 V e 1200 V são comuns em mercado) e podem operar com cargas que demandem uma corrente elevada (existem modelos que possibilitam trabalhar com até 90 A).

A Tabela 2.1 mostra um comparativo entre os três tipos de transistores de potência.

Tabela 2.1 – Comparativo entre os tipos de transistores de potência

| Device<br>Characteristic | Power<br>Bipolar                  | Power<br>MOSFET                  | IGBT                            |
|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Voltage Rating           | High <1kV                         | High <1kV                        | Very High >1kV                  |
| Current Rating           | High <500A                        | Low <200 <sup>a</sup>            | High >500 <sup>a</sup>          |
| Input Drive              | Current<br>20-200 h <sub>FE</sub> | Voltage<br>V <sub>GS</sub> 3-10V | Voltage<br>V <sub>GS</sub> 4-8V |
| Input Impedance          | Low                               | High                             | High                            |
| Output Impedance         | Low                               | Medium                           | Low                             |
| Switching Speed          | Slow (μs)                         | Fast (ns)                        | Medium                          |
| Cost                     | Low                               | Medium                           | High                            |

Fonte: STORR, 2015.

Nota-se que o principal fator limitante do *IGBT*, se comparado às outras tecnologias de transistores, é seu custo.

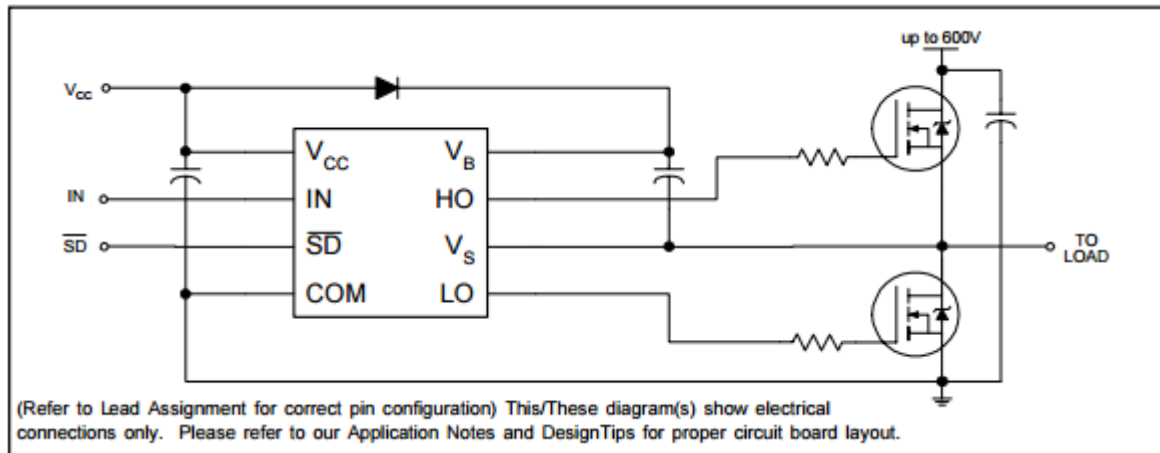
## 2.4 DRIVERS DE CHAVEAMENTO DA FAMÍLIA IR21XX

Com a crescente utilização de conversores e reguladores chaveados no mercado e, tendo em vista que a utilização de *IGBTs* para melhor funcionamento desta configuração de circuito era necessária, viu-se a necessidade de criar uma interface de fácil utilização entre sinal de controle e os elementos a serem chaveados.

Assim foi criada a família *IR21XX* de *drivers* de chaveamento da marca *International Rectifier*. Esta família consiste em circuitos integrados que conseguem operar com elevados valores de tensão (existem modelos de 600 V e 1200 V), alta velocidade e são capazes de controlar o *dead time* (tempo morto) entre o acionamento dos transistores que operam no chaveamento, o que evita problemas de condução cruzada no circuito. Além disso, são capazes de entregar na saída pulsos de elevada corrente para maior velocidade na saturação dos transistores.

A conexão típica utilizada com esses componentes é exemplificada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Conexão típica de um *driver* de chaveamento da família *IR21XX*



Fonte: INTERNATIONAL RECTIFIER, 2003.

O *driver* utiliza como entrada um sinal de controle, através do qual será definida a frequência de chaveamento do conversor. Este sinal pode ter amplitude máxima 3,3 V a 15 V.

## 2.5 FOTODIODO

O fotodiodo é um diodo construído de forma que a região de polarização reversa da junção *pn* seja sensível a luz. Sendo assim, a incidência de luz altera os valores de corrente reversa, de forma quase linear. A Figura 2.2 é um exemplo deste componente.

Figura 2.2 – Fotodiodo



Fonte: TEM ELETRONIC COMPONENTS, 2015.

Pode-se dizer que o fotodiodo inversamente polarizado é capaz de converter luz em corrente elétrica, sendo a referência utilizada a corrente reversa que este conduz enquanto está na ausência de luz, chamada de corrente negra.

Como os tempos de transição de subida ou descida são da ordem de ns, o componente pode operar em dispositivos que necessitam uma resposta rápida, como sistemas de transmissão por fibra ótica ou fotodetectores. Em contrapartida, sua alteração de corrente em

função da intensidade luminosa é da ordem de nA, sendo assim é preciso um estágio de amplificação desta variação para que seja possível utilizá-la em um processo de controle ou análise.

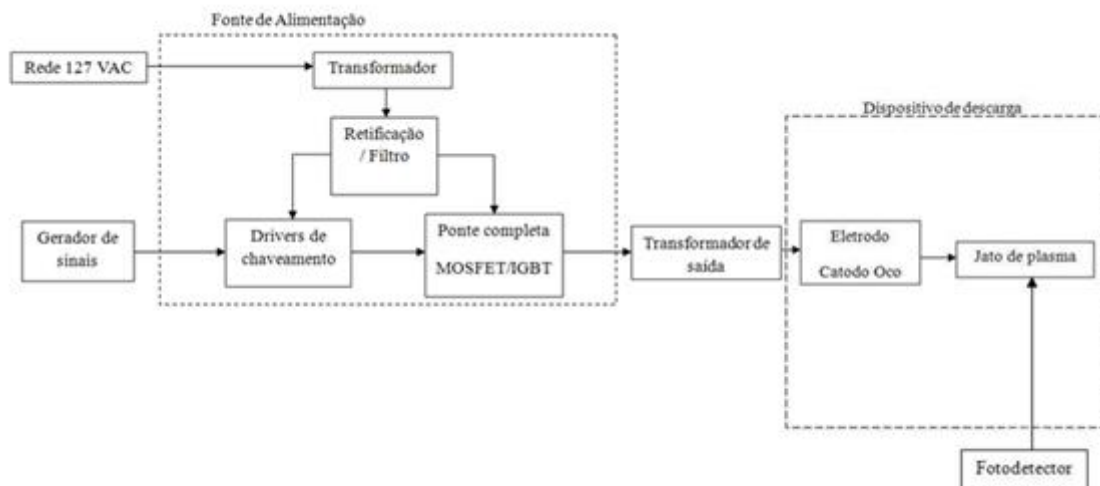
### **3 PARTE EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS**

Nesta seção são apresentados todos os equipamentos utilizados e procedimentos realizados para a produção das microplumas de plasma, bem como o desenvolvimento dos dispositivos projetados para a realização deste trabalho.

### 3.1 *SETUP* DO DISPOSITIVO DE MICRODESCARGAS

O dispositivo de microdescargas em pressão atmosférica é composto por diversos módulos e equipamentos, como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do setup do dispositivo de microdescargas



Fonte: Produção do próprio autor

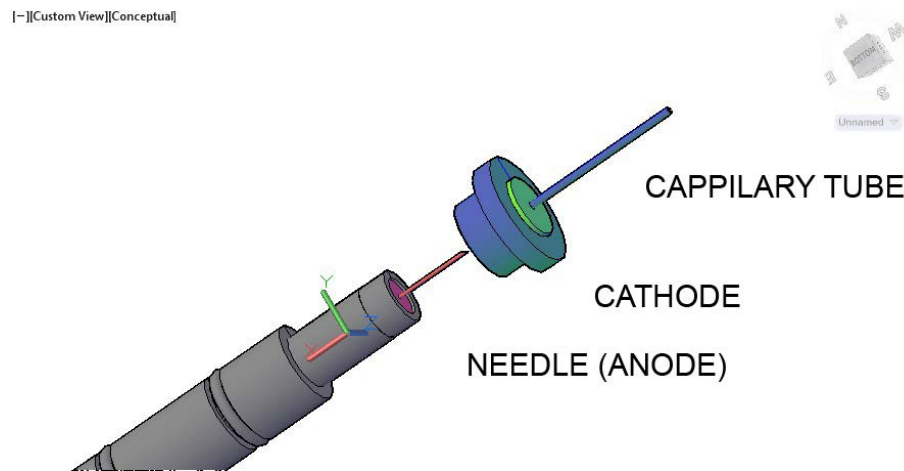
O dispositivo conta com dois módulos principais: a fonte de alimentação, responsável por produzir a tensão AC que produzirá a ionização do gás para a geração da pluma; e o dispositivo de descarga, que consiste no eletrodo onde a descarga será realizada e toda a peça de fixação do mesmo e vedação para evitar vazamentos do gás.

Externo a estes módulos existe o sistema de aquisição de medidas elétricas e fotoelétricas (fotodetector), um transformador responsável por elevar a tensão de saída da fonte a um valor suficiente para atingir o *breakdown* do gás utilizado e um gerador de sinais, cuja função é gerar o sinal de controle do conversor chaveado.

### 3.2 DISPOSITIVO DE DESCARGA

O dispositivo utilizado no sistema, apresentado na Figura 3.2 possui a configuração de catodo oco, onde o gás hélio flui axialmente por uma agulha central de diâmetro 0,7 mm. Em torno da agulha existe um capilar de boro-silicato de diâmetro 1 mm isolando o catodo (agulha) do anodo (anel metálico). Este capilar, nos primeiros protótipos do sistema, não resistia às temperaturas atingidas pelo jato, pois um arco era formado entre o anodo e o catodo e o capilar se rompia após um curto período de uso. Este rompimento tornava a chama alaranjada e comprometia o funcionamento do sistema, tanto por perda de intensidade quanto por desgaste das partes mecânicas. A nova configuração do dispositivo solucionou o problema encontrado.

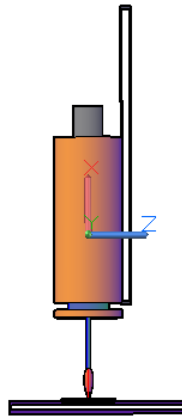
Figura 3.2 – Dispositivo de descarga



Fonte: Produção do próprio autor

Esta configuração é importante, pois permite que plasma seja projetado para fora do tubo, como uma chama. Desta maneira o dispositivo pode ser utilizado para tratamento de superfícies. Experimentalmente, observou-se que a chama se projeta com maior comprimento quando a distância entre o anodo e o fim do capilar vale 3 mm. A Figura 3.3 apresenta o posicionamento da peça.

Figura 3.3 – Configuração para tratamento de amostras



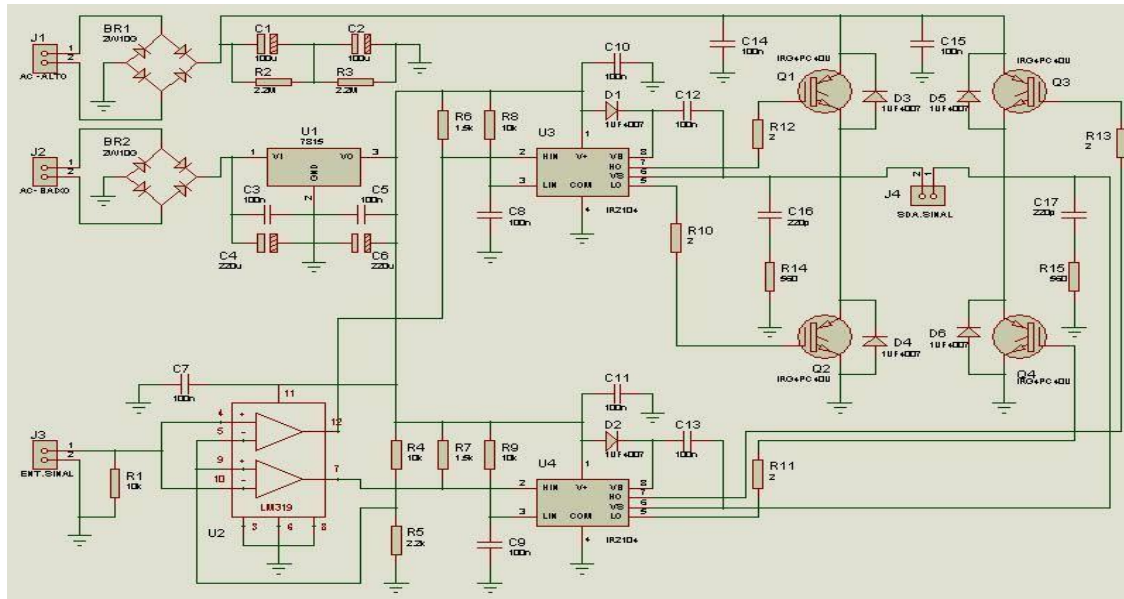
Fonte: Produção do próprio autor

O dispositivo foi posicionado na vertical, com o jato apontado para baixo. A amostra a ser tratada foi colocada entre o eletrodo e um anteparo metálico, que possui a função de direcionar melhor o jato.

### 3.2 CONVERSOR DE TENSÃO

O esquema elétrico do circuito do conversor de tensão é apresentado na Figura 3.4. O conversor utiliza quatro transistores *IGBT* do modelo *IRG4PC40U* (Apêndice B) em uma configuração conhecida por ponte-completa. Dois *drivers* do modelo *IR2104* (Apêndice C) foram utilizados para acionar os transistores em pares (chamados de meia-ponte), o sinal de entrada desses *drivers* define a frequência de chaveamento. A tensão de saída da fonte foi definida pela tensão de coletor aplicada nos transistores da parte alta de cada meia-ponte do circuito.

Figura 3.4 – Esquema elétrico do conversor de tensão



Fonte: Produção do próprio autor

Esta tensão de saída foi aplicada no primário de um transformador que possui duas funções: elevar a tensão de saída para ser aplicada no eletrodo e isolar a carga do circuito da fonte.

O sinal de controle foi obtido através de um gerador de funções *Topward 8110*, esse sinal foi defasado em  $0^\circ$  e  $180^\circ$  utilizando um comparador *LM319* (Apêndice D) e chegou à entrada dos *drivers* de chaveamento. Esses componentes têm a função de fornecer tensão de *gate* suficiente para ativar os *IGBTs* e garantir o *dead time* entre o acionamento dos estágios do circuito ponte, o que é de extrema importância para evitar curtos-circuitos no equipamento devido ao efeito de chaveamento cruzado.

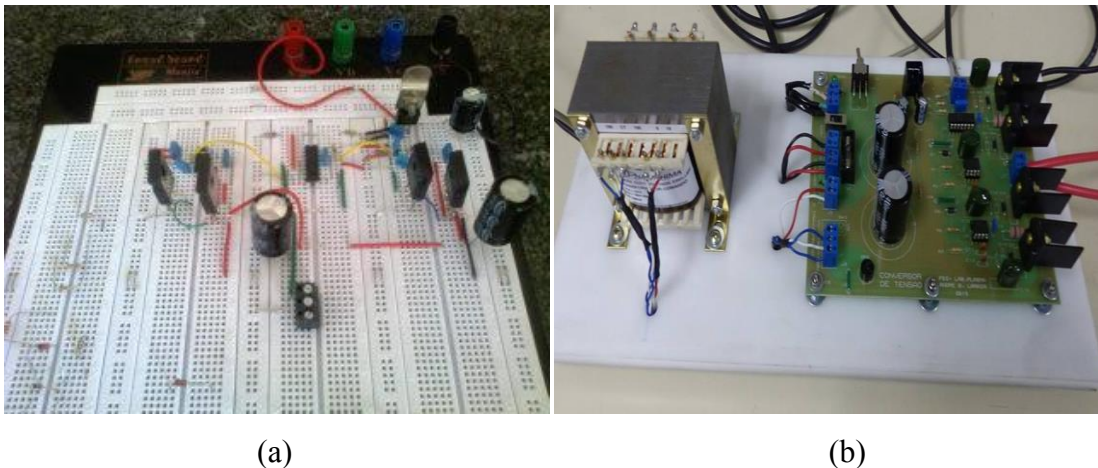
Em um primeiro protótipo a tensão de polarização do circuito ponte-completa foi proveniente de uma fonte de bancada regulada ajustável do modelo *FET303 (Eletroteste)*, os testes foram feitos com tensão de 30 V. Porém, na versão final, esta tensão será obtida através de um transformador elevador com o primário ligado na rede 127 VAC e o secundário retificado por uma ponte *2W10* (Apêndice E) e filtrada por dois capacitores  $100\ \mu\text{F}$  400 V em série. Deseja-se com isso atingir tensões de ponte da ordem de 500 V, obtendo tensões de saída próximas a 1 kVpp.

Um ponto crítico para o acionamento da ponte completa é que os transistores superiores de cada metade não podem ser acionados diretamente, pois têm os terminais de emissor conectados ao transformador. Devido ao efeito da indutância do transformador a tensão desses pontos flutua durante a operação do circuito, de forma que a tensão de *gate* deve flutuar com a

tensão de emissor para evitar uma tensão *gate-emissor* ( $V_{GE}$ ) muito elevada, danificando assim o componente (FIGINI, 2002). Para evitar esse problema foram utilizados circuitos de *bootstrap* para operar juntamente ao *driver* de chaveamento, que consistem em um diodo rápido *1UF4007* (Apêndice F) e um capacitor de 100 nF com a função de elevar o referencial da tensão de *gate* dos *IGBT* superiores da ponte, criando assim um efeito de terra flutuante. Também são utilizados diodos rápidos do mesmo modelo citado para proteger os transistores de surtos de tensão negativa entre coletor-emissor.

A tensão de saída do conversor pode ser definida pela escolha da relação de transformação do transformador de saída do conversor. A Figura 3.5 (a) é uma fotografia do protótipo e a Figura 3.5 (b) uma fotografia do equipamento desenvolvido no trabalho.

Figura 3.5 – (a) Protótipo do conversor de tensão; (b) Conversor de tensão desenvolvido

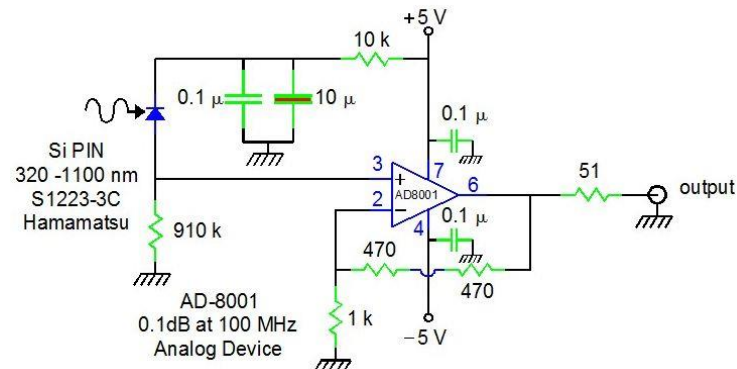


Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3 FOTODETECTOR

O sistema de microdescargas conta com um fotodetector, cujo esquema elétrico é apresentado na Figura 3.6, que utiliza um fotodiodo da Hamamatsu, modelo 1223 3C (Apêndice G), que responde a um comprimento de onda de 320 nm a 1100 nm, um amplificador operacional de alta velocidade AD8001 (Apêndice H) e a uma realimentação de corrente.

Figura 3.6 – Esquema elétrico do fotodetector



Fonte: Produção do próprio autor

O circuito pode ser ligado diretamente à entrada de  $50\ \Omega$  de um osciloscópio através de um cabo de também  $50\ \Omega$  de impedância. São utilizados dois resistores em série como realimentação a fim de diminuir o efeito de capacitância parasita dos resistores (HAMAMATSU, 2008). A Figura 3.7 apresenta o equipamento fotodetector desenvolvido.

Figura 3.7 – Equipamento fotodetector



Fonte: Produção do próprio autor

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

#### 4.1 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE DESCARGAS

Os testes neste tópico foram realizados com uma versão anterior do conversor chaveado desenvolvido no Laboratório de Plasma do Departamento de Física e Química da UNESP – Guaratinguetá, utilizando uma topologia de ponte completa composta por *BJT*. O objetivo dos ensaios foi verificar o funcionamento do dispositivo de microdescargas. O jato obtido é apresentado na Figura 4.1, o gás utilizado foi o hélio na vazão de 0,86 l/min (2 SCFH).

Figura 4.1 – Jato de plasma obtido com hélio



Fonte: Produção do próprio autor

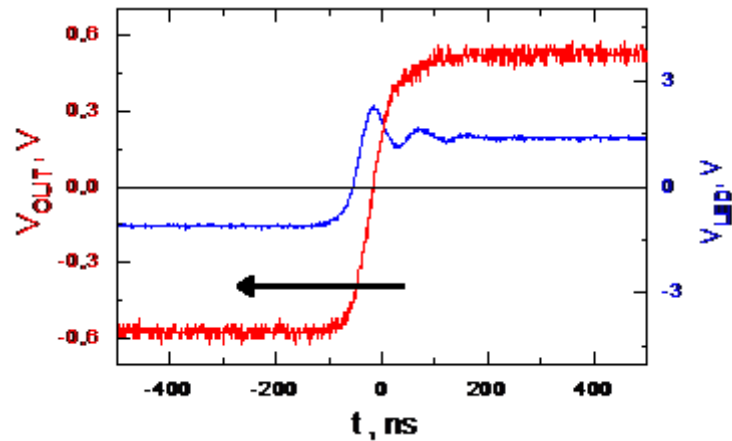
A pluma produzida com hélio possui uma coloração bastante azulada, diferente da cor alaranjada característica do regime de arco. Durante todo o teste, o capilar de boro-silicato não foi rompido, permitindo que o processo seja realizado por tempo prolongado e mostrando que o dispositivo está operando de forma adequada. A maior pluma obtida teve um comprimento de, aproximadamente, 7 mm para fora do capilar.

#### 4.2 ENSAIOS UTILIZANDO AQUISIÇÃO FOTOELÉTRICA

Para se realizar aquisições utilizando o fotodetector desenvolvido neste trabalho, inicialmente foi feito um teste de tempo de atraso do mesmo, para averiguar se o equipamento faria medições coesas quando utilizado no *setup* de microdescargas.

O teste foi feito utilizando um *LED* vermelho piscando na frequência de 40 kHz para observar o tempo de subida do equipamento. O resultado é apresentado na Figura 4.2.

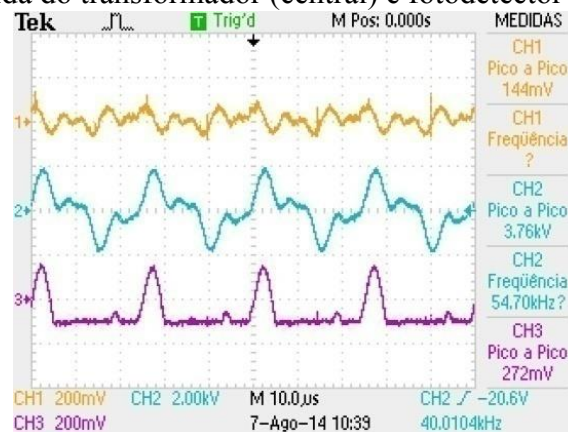
Figura 4.2 – Sinal do LED ( $V_{LED}$ ) e sinal da saída do fotodetector ( $V_{OUT}$ )



Fonte: Produção do próprio autor

É notável que os atrasos são mínimos, já que o início e fim da subida acontecem em ambos os sinais praticamente ao mesmo tempo. Assim, o fotodetector foi utilizado para a aquisição do sinal luminoso do jato de plasma e os resultados são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Sinal de saída do transformador (central) e fotodetector (inferior)



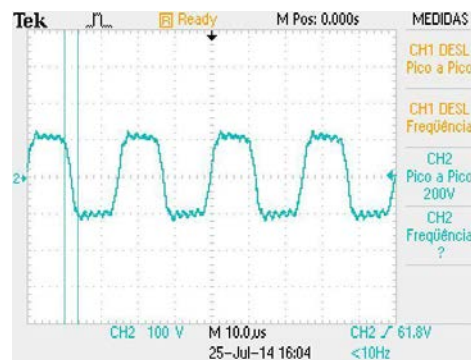
Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se notar que, toda vez que o sinal de saída da fonte (canal 2) apresenta um pico de tensão positiva, o sinal do fotodetector (canal 3) também apresenta uma elevação de tensão, acusando assim um sinal luminoso. À medida que a tensão de saída começa a diminuir, o sinal do fotodetector também diminui, caracterizando uma diminuição de intensidade luminosa do plasma.

### 4.3 MEDIÇÕES DE TENSÃO NO PROTÓTIPO DA NOVA TOPOLOGIA DO CONVERSOR E COMPARAÇÕES COM A VERSÃO ANTERIOR DO DISPOSITIVO

Como visto na Figura 4.3, a forma de onda de saída do transformador não se aproxima da forma pulsada desejada. Isso é devido a dois fatores: o transformador de saída não responde de forma adequada ao sinal de 40 kHz do conversor utilizado e o chaveamento deste não está pulsado como o esperado devido aos longos tempos de comutação no sinal de chaveamento da ponte completa. O sinal de saída é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Saída do conversor chaveado sem *drivers*



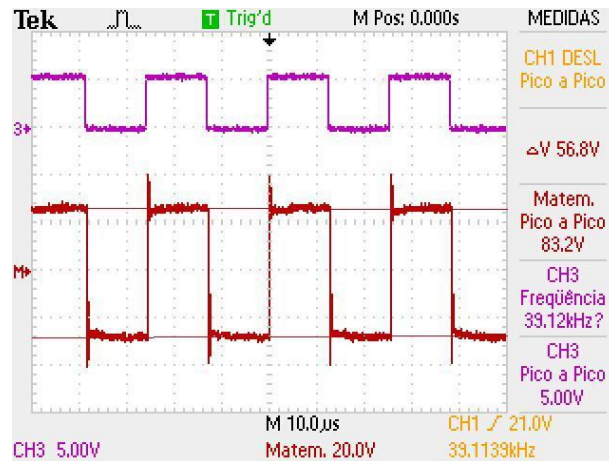
Fonte: Produção do próprio autor

Este teste foi feito com uma frequência de chaveamento de 40 kHz, tensão de ponte de, aproximadamente, 100 V e carga resistiva de 5 W.

Com a nova arquitetura do circuito implementada neste trabalho, espera-se, primeiramente, atingir tensões de saída mais elevadas, o que permite a redução da relação de espiras do transformador de saída e assim uma melhor resposta em frequência. Outro benefício é uma forma de onda pulsada com tempos de comutação menores, permitindo assim a análise do jato obtido através de descargas pulsadas. Com o uso de um gerador de função externo para fornecer o sinal de controle do equipamento, é possível trabalhar com sinais do tipo *TTL* de 5 kHz a 40 kHz, e não apenas 40 kHz como a arquitetura anterior com sinal de controle interno limitava.

A Figura 4.5 apresenta o sinal de saída do protótipo que possui os *drivers*. O teste também foi realizado em 40 kHz, porém com uma tensão de ponte de 30 V, pois é o máximo fornecido pelas fontes de bancadas do laboratório. Todavia, foi utilizada uma carga de 40 W neste ensaio.

Figura 4.5 – Saída do conversor chaveado com *drivers*

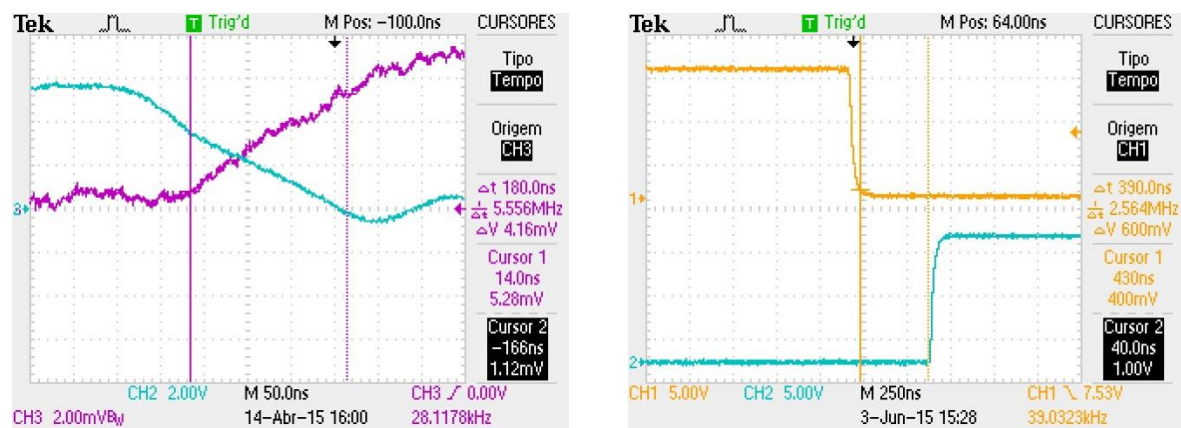


Fonte: Produção do próprio autor

O tempo de descida e de subida da fonte utilizada anteriormente é da ordem de 4  $\mu$ s cada. Já o do protótipo só é perceptível se trocada a escala de tempo no osciloscópio e vale, aproximadamente, 100 ns.

Finalmente, comparou-se o sinal de chaveamento nos dois circuitos. A Figura 4.6 (a) apresenta o sinal medido na base dos *BJTs* da ponte completa utilizada anteriormente, e a Figura 4.6 (b) o sinal medido no *gate* dos *IGBTs* do protótipo do novo conversor.

Figura 4.6 – (a) Medição de *dead time* sem *driver* de chaveamento; (b) Medição de *dead time* com *driver* de chaveamento



Fonte: Produção do próprio autor

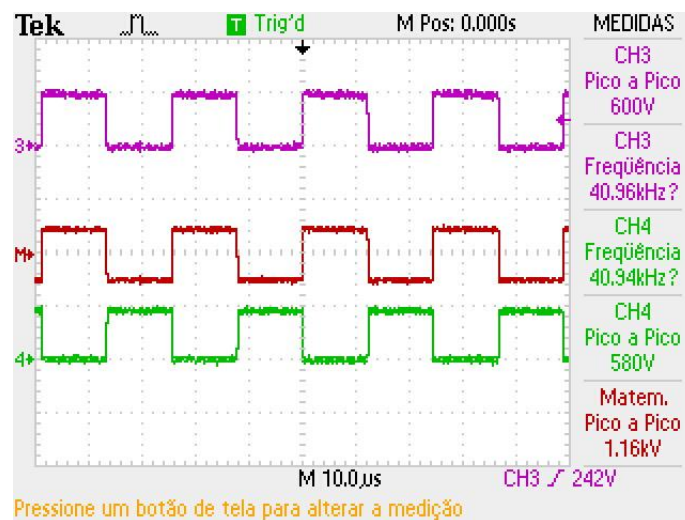
Nota-se que o sinal de chaveamento apresentado na Figura 4.4 (a) não possui um *dead time* bem definido, o que pode acarretar em comutação simultânea de ambas as metades da ponte, chamada condução cruzada, comprometendo o funcionamento do dispositivo. Já o sinal de chaveamento no circuito modificado apresenta um *dead time* de 390 ns graças aos

*drivers IR2104*, o que garante que a condução cruzada não ocorrerá e que os testes com alta tensão podem ser realizados com segurança.

#### 4.4 MEDIÇÕES NO CONVERSOR PARA TESTES NA TENSÃO DE TRABALHO (ALTA TENSÃO)

Com um *dead time* bem definido como apresentado na nova arquitetura, o *layout* do circuito foi desenhado utilizando o software Proteus 8 Professional ARES e montado em PCI (placa de circuito impresso). Desta forma, foi possível realizar ensaios com carga resistiva de 50 W agora com uma tensão de ponte de, aproximadamente, 535 V. Neste teste eram esperados valores próximos a 1 kV pico-a-pico de saída. O resultado é apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Saída do conversor chaveado com *drivers* operando na tensão de trabalho

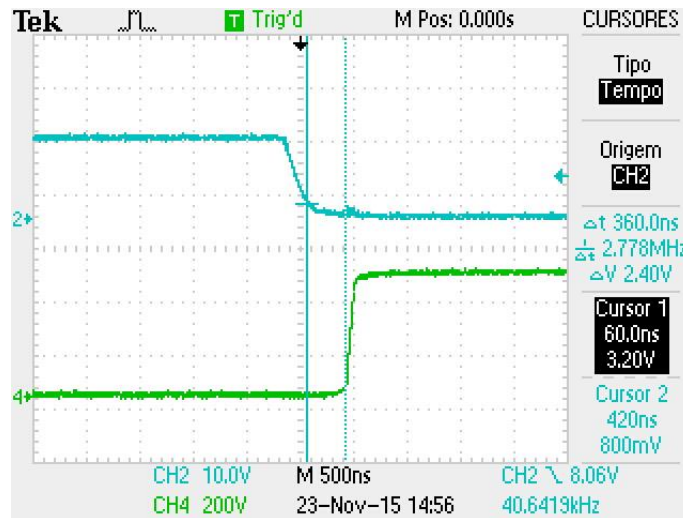


Fonte: Produção do próprio autor

São visíveis as melhorias no sinal de saída. Com um tempo de subida e descida de, aproximadamente, 70 ns, a forma de onda apresenta uma forma quadrada bem definida como o desejado, com tensão pico-a-pico próxima a 1,1 kV. As oscilações de subida e descida vistas na saída do protótipo também foram erradicadas.

Também foram checados os sinais de *dead time* no equipamento, para averiguar se estes estavam bem definidos, evitando assim superaquecimento dos dissipadores dos *IGBTs* e, em piores casos de condução cruzada, danos nos transistores. O sinal obtido é apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – *Dead time* do conversor chaveado operando na tensão de trabalho



Fonte: Produção do próprio autor

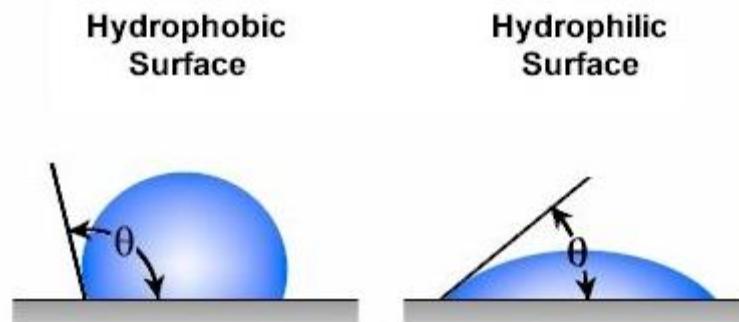
Os *dead time* do equipamento estão próximos aos obtidos nas medições feitas no protótipo, próximos a 400 ns e sem distorções, garantindo assim a boa operação do sistema.

#### 4.5 ENSAIOS DE ÂNGULO DE CONTATO

Como dito, o objetivo do sistema de microdescargas em gases na pressão atmosférica é o tratamento de superfícies. Sendo assim o sistema foi utilizado para tratar amostras de politereftalato de etileno (PET) com jatos de plasma. O jato de plasma é aplicado em 90° à superfície da amostra durante oito segundos, tempo esse suficiente para saturação do tratamento. Feito isso, é feito um teste de ângulo de contato na superfície a fim de verificar a molhabilidade do material, ou seja, se a superfície se tornou mais hidrofílica (maior absorção de água) ou hidrofóbica (menor absorção de água).

O ensaio consiste em depositar uma gota de água de volume 170 nL em uma superfície tratada e medir seu ângulo de contato  $\theta$ . Em seguida, é depositada uma gota de igual volume em uma superfície não tratada e medido seu ângulo  $\theta$ , finalmente, comparam-se os resultados. O ensaio é realizado utilizando um equipamento específico da Ramé-Hart, um exemplo da análise é mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Exemplo de comparação de ângulo de contato

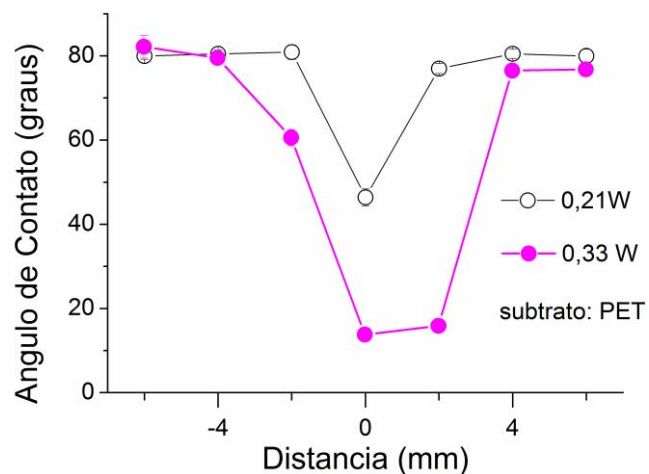


Fonte: PANT, 2003.

A superfície que recebeu o tratamento com jato de plasma apresentou um ângulo de contato de  $39^\circ$ , muito menor que o ângulo observado na superfície não tratada, que foi de  $78^\circ$ . Sendo assim conclui-se que a superfície tratada é mais hidrofílica, justificando o tratamento.

Foi analisada também a influência da potência da descarga utilizada no tratamento. A Figura 4.10 mostra que, com uma potência maior, é possível atingir menores ângulos de contato, ou seja, é possível tornar a superfície mais hidrofílica.

Figura 4.10 – Influência da potência da descarga no ângulo de contato



Fonte: Produção do próprio autor

## 5 CONCLUSÕES

O jato de plasma apresentado pelo sistema foi excelente, o dispositivo de descarga permite que o jato seja projetado sem danificar o capilar de boro-silicato. O plasma é projetado a 4 mm de distância, o suficiente para fazer o tratamento de superfície de materiais.

O dispositivo de fotodetecção apresentou resultados muito satisfatórios quanto a tempo de resposta e nível de sinal. Como a intensidade luminosa é proporcional a densidade eletrônica no plasma esta técnica de medição é uma alternativa viável para análise e caracterização do jato de plasma. As medições mostraram que a intensidade luminosa aumenta com o aumento da potência elétrica aplicada.

O protótipo apresentou diversas melhorias perante a arquitetura usada anteriormente no conversor chaveado, tais como a possibilidade de operar na faixa de frequência de 5 kHz a 40 kHz; uma maior eficiência devido a redução do tempo de comutação, diminuindo as perdas nos transistores; e uma significativa redução na relação de espiras do transformador de saída, graças ao aumento da tensão de saída no circuito ponte-completa. O equipamento desenvolvido respondeu melhor que o esperado nos ensaios, se mostrando viável para operar no dispositivo de microdescargas em gases em pressão atmosférica.

Sendo assim, o próximo passo é desenvolver um multiplicador de transformadores para elevar a tensão de saída da ponte para um nível que atinja os valores de *breakdown* do hélio (4,5 kV pico-a-pico aproximadamente) ou até mesmo do argônio (8 kV pico-a-pico aproximadamente), permitindo assim que o plasma seja gerado por um setup desenvolvido completamente no Laboratório de Plasma da UNESP – Guaratinguetá. Outra melhoria pertinente seria a automação do sistema, garantindo assim precisão e rapidez no processo de tratamento de superfícies.

## REFERÊNCIAS

- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics: an Introduction**, INPECOM/RPE, v. 1, 1979.
- FIGINI, G. **Eletrônica Industrial: Circuitos e Aplicações**. Editora Hemus, 2002;
- HAMAMATSU PHOTONICS K.K. **Application Circuit Examples of Si Photodiode**. Hamamatsucity, Japan. 2008.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projeto de Circuitos**. New York: Mc Growhill, 2012.
- INTERNATIONAL RECTIFIER. **IR2104(S): HALF-BRIDGE DRIVER**. Disponível em: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/irf/ir2104.pdf>>. Acesso em: 7 fev. 2015.
- KOSTOV, K.G et al. **Characteristics of dielectric barrier discharge reactor for material treatment**. Brazilian J. Phys., V.39, p.012054, 2009.
- LARAIA, A.B., KAYAMA, M.E., ANDRADE, A. W. F. Geração de plasma com microdescargas e sua caracterização ótica. In: Congresso de Iniciação Científica da UNESP (CIC), 26, 2014, Guaratinguetá. **Anais...** Guaratinguetá: UNESP, 2014.
- LI, X., TAO, X. e YIN, Y. **An atmospheric-pressure glow-discharge plasma jet and its application**. IEEE Trans. Plasma Science, vol.37, no.6, p.759, 2009.
- PANT, A. Disponível em: <<http://awesci.com/super-hydrophobic-surfaces-unbelievable/>>. Acesso em: 10 out. 2015.
- PFENDER, E. **Eletric Ares and Are Gas Heaters in Gaseous Eletronics**. New York: Academic, 1978. v 1.
- SCHOENBACH, K.H et al. **High pressure hollow cathode discharges**. Plasma Sources Sci. Technol, vol.6, p.468, 1997.
- STORR, Wayne. **Insulated Gate Bipolar Transistor**. Disponível em: <<http://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html/>>. Acesso em: 7 fev. 2015.
- TEM ELETRONIC COMPONENTS. Disponível em: <[www.tme.eu](http://www.tme.eu)>. Acesso em: 6 jun. 2014.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AUBERT, X et al. **Analysis of the self-pulsing operating mode of a microdischarge**, Plasma Sources Sci. Technol., vol.16, p.23, 2007.

CIPELLI, A. M. V., SANDRINI W. J., MARKUS O. **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**, Editora Érica, 23ª edição, 2001.

KAYAMA, M.E et al. Electrical characteristics of a needle microdischarge. In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), 36, 2015, Vitória. **Anais...** Vitória: SBV, 2015.

LARAIA, A.B et al. **Excluded flux measurements in a compact torus generated in a single one turn coil**, 2013.

LARAIA, A.B., KAYAMA, M.E., Conversor de tensão para geração de plasma com microdescargas. In: Congresso de Iniciação Científica da UNESP (CIC), 27, 2015, Atibaia. **Anais...** Atibaia: UNESP, 2015

LARAIA, A.B., HONDA, R.Y., KAYAMA, M.E. Switching voltage converter for plasma device. In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), 36, 2015, Vitória. **Anais...** Vitória: SBV, 2015.

REIS, D.G.A., LARAIA, A.B., KAYAMA, M.E. Cascade pulse transformers used with a switching voltage converter for plasma device at atmospheric pressure. In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), 36, 2015, Vitória. **Anais...** Vitória: SBV, 2015.

SCHOENBACK, K.H et al. **Microhollow cathode discharges applied**. Physics Letters, vol. 68, no.1, p13, 1996.

SILVA, L. J. **Desenvolvimento e aplicação de microplumas para tratamento de politerftalato de etileno (PET)**. 2015. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2015.

## APÊNDICE A – DEMAIS PUBLICAÇÕES DESTE TRABALHO

Este trabalho também foi apresentado, em partes, nas seguintes publicações com o mesmo autor como o principal:

LARAIA, A.B., KAYAMA, M.E., ANDRADE, A. W. F. Geração de plasma com microdescargas e sua caracterização ótica. In: Congresso de Iniciação Científica da UNESP (CIC), 26, 2014, Guaratinguetá. **Anais...** Guaratinguetá: UNESP, 2014.

LARAIA, A.B., HONDA, R.Y., KAYAMA, M.E. Switching voltage converter for plasma device. In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), 36, 2015, Vitória. **Anais...** Vitória: SBV, 2015.

LARAIA, A.B., KAYAMA, M.E., Conversor de tensão para geração de plasma com microdescargas. In: Congresso de Iniciação Científica da UNESP (CIC), 27, 2015, Atibaia. **Anais...** Atibaia: UNESP, 2015

Tendo neste último obtido menção honrosa dentre os trabalho apresentados na área de ciências exatas.

## APÊNDICE B – DATASHEET IRG4PC40U

International  
**IR** Rectifier

PD 91466E

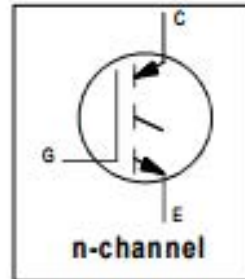
**IRG4PC40U**

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

UltraFast Speed IGBT

**Features**

- UltraFast: Optimized for high operating frequencies 8-40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- Industry standard TO-247AC package



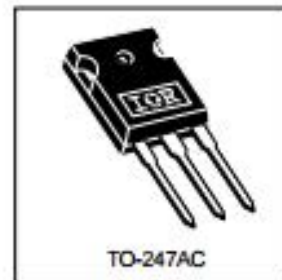
$V_{CES} = 600V$

$V_{CE(on) typ.} = 1.72V$

$@V_{GE} = 15V, I_C = 20A$

**Benefits**

- Generation 4 IGBT's offer highest efficiency available
- IGBT's optimized for specified application conditions
- Designed to be a "drop-in" replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBT's



TO-247AC

**Absolute Maximum Ratings**

|                           | Parameter                               | Max.                              | Units      |
|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|------------|
| $V_{CES}$                 | Collector-to-Emitter Voltage            | 600                               | V          |
| $I_C @ T_C = 25^\circ C$  | Continuous Collector Current            | 40                                | A          |
| $I_C @ T_C = 100^\circ C$ | Continuous Collector Current            | 20                                |            |
| $I_{CM}$                  | Pulsed Collector Current $\Phi$         | 160                               |            |
| $I_{LM}$                  | Clamped Inductive Load Current $\Phi$   | 160                               |            |
| $V_{GE}$                  | Gate-to-Emitter Voltage                 | $\pm 20$                          | V          |
| $E_{ASV}$                 | Reverse Voltage Avalanche Energy $\Phi$ | 15                                | mJ         |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$  | Maximum Power Dissipation               | 160                               | W          |
| $P_D @ T_C = 100^\circ C$ | Maximum Power Dissipation               | 65                                |            |
| $T_J$                     | Operating Junction and                  | $-55$ to $+150$                   | $^\circ C$ |
| $T_{STG}$                 | Storage Temperature Range               |                                   |            |
|                           | Soldering Temperature, for 10 sec.      | 300 (0.063 in. (1.6mm) from case) |            |
|                           | Mounting torque, 6-32 or M3 screw.      | 10 lbf-in (1.1N-m)                |            |

**Thermal Resistance**

|                 | Parameter                                 | Min.  | Typ.     | Max.  | Units        |
|-----------------|-------------------------------------------|-------|----------|-------|--------------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case                          | ----- | -----    | 0.77  | $^\circ C/W$ |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, flat, greased surface       | ----- | 0.24     | ----- |              |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient, typical socket mount | ----- | -----    | 40    |              |
| Wt              | Weight                                    | ----- | 6 (0.21) | ----- | g (oz)       |

www.irf.com

1

12/30/00

# APÊNDICE C – DATASHEET IR2104(S)

International  
**IR** Rectifier

Data Sheet No. PD60046-R

## IR2104(S)

### HALF-BRIDGE DRIVER

#### Product Summary

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| $V_{\text{OFFSET}}$        | 600V max.       |
| $I_{\text{O+/-}}$          | 130 mA / 270 mA |
| $V_{\text{OUT}}$           | 10 - 20V        |
| $t_{\text{on/off (typ.)}}$ | 680 & 150 ns    |
| Deadtime (typ.)            | 520 ns          |

#### Features

- Floating channel designed for bootstrap operation  
Fully operational to +600V  
Tolerant to negative transient voltage  
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V and 15V input logic compatible
- Cross-conduction prevention logic
- Internally set deadtime
- High side output in phase with input
- Shut down input turns off both channels
- Matched propagation delay for both channels

#### Description

The IR2104(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with dependent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates from 10 to 600 volts.

#### Packages

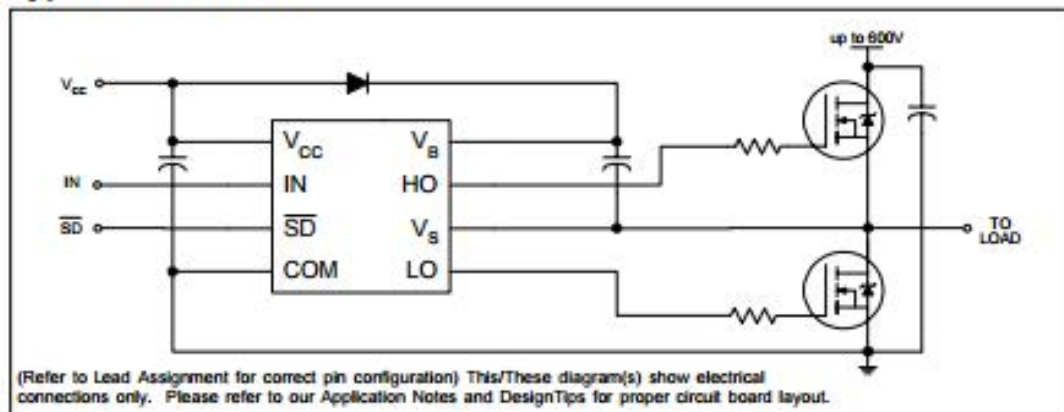


8 Lead SOIC  
IR2104S



8 Lead PDIP  
IR2104

#### Typical Connection



## APÊNDICE D – DATASHEET LM319


[www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

# LM319

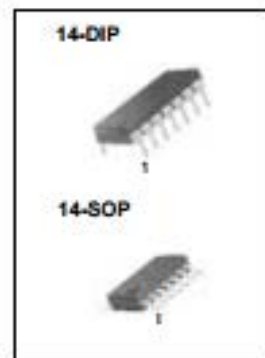
## Dual Comparator

### Features

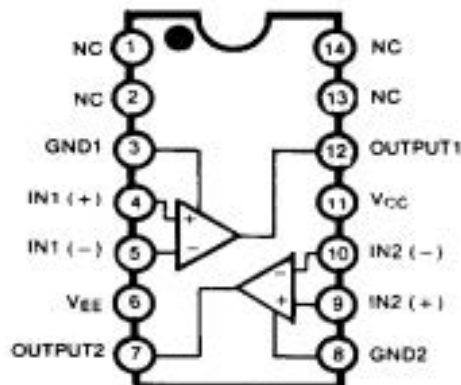
- Operates from a single 5V supply
- Typically 80ns response time at  $\pm 15V$
- Open collector outputs : up to + 35V
- High output drive current : 25mA
- Inputs and outputs can be isolated from system ground
- Minimum fan-out of 2 (each side)
- Two independent comparators

### Description

The LM319 is a dual high speed voltage comparator designed to operate from a single + 5V supply up to  $\pm 15V$  dual supplies. Open collector of the output stage makes the LM319 compatible with RTL, DTL and TTL as well as capable of driving lamps and relays at currents up to 25mA. Typical response time of 80ns with  $\pm 15V$  power supplies makes the LM319 ideal for application in fast A/D converts, level shifters, oscillators, and multivibrators.



### Internal Block Diagram



Rev. 1.0.2

## APÊNDICE E – DATASHEET 2W10



## 2W005 – 2W10

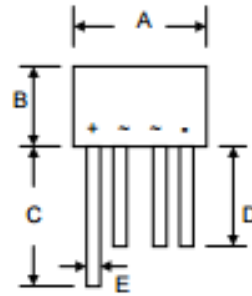
### 2.0A BRIDGE RECTIFIER

#### Features

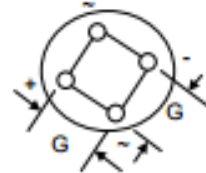
- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability
- Ideal for Printed Circuit Boards
- UL Recognized File # E157705

#### Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: As Marked on Body
- Weight: 1.3 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number



| RB-20                |      |      |
|----------------------|------|------|
| Dim                  | Min  | Max  |
| A                    | 9.10 | 9.40 |
| B                    | 6.90 | 7.40 |
| C                    | 27.9 | —    |
| D                    | 25.4 | —    |
| E                    | 0.71 | 0.81 |
| G                    | 4.60 | 5.60 |
| All Dimensions in mm |      |      |



#### Maximum Ratings and Electrical Characteristics @T<sub>A</sub>=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.

| Characteristic                                                                                                        | Symbol                                                 | 2W005       | 2W01 | 2W02 | 2W04 | 2W06 | 2W08 | 2W10 | Unit |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Peak Repetitive Reverse Voltage<br>Working Peak Reverse Voltage<br>DC Blocking Voltage                                | V <sub>RRM</sub><br>V <sub>RRM</sub><br>V <sub>R</sub> | 50          | 100  | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 | V    |
| RMS Reverse Voltage                                                                                                   | V <sub>R(RMS)</sub>                                    | 35          | 70   | 140  | 280  | 420  | 560  | 700  | V    |
| Average Rectified Output Current<br>(Note 1)<br>@T <sub>A</sub> = 50°C                                                | I <sub>O</sub>                                         | 2.0         |      |      |      |      |      |      | A    |
| Non-Repetitive Peak Forward Surge Current<br>8.3ms Single half sine-wave superimposed on<br>rated load (JEDEC Method) | I <sub>FSM</sub>                                       | 50          |      |      |      |      |      |      | A    |
| Forward Voltage (per element)<br>@I <sub>F</sub> = 2.0A                                                               | V <sub>FM</sub>                                        | 1.0         |      |      |      |      |      |      | V    |
| Peak Reverse Current<br>At Rated DC Blocking Voltage<br>@T <sub>A</sub> = 25°C<br>@T <sub>A</sub> = 100°C             | I <sub>RM</sub>                                        | 10<br>500   |      |      |      |      |      |      | µA   |
| Operating Temperature Range                                                                                           | T <sub>J</sub>                                         | -55 to +125 |      |      |      |      |      |      | °C   |
| Storage Temperature Range                                                                                             | T <sub>STG</sub>                                       | -55 to +150 |      |      |      |      |      |      | °C   |

Note: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.

## APÊNDICE F – DATASHEET 1UF4007



**Discrete POWER & Signal  
Technologies**

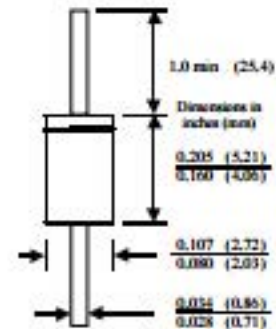
## UF4001 - UF4007

### Features

- Low forward voltage drop.
- High surge current capability.
- High reliability.
- High current capability.



**DO-41**  
COLOR BAND DENOTES CATHODE



## 1.0 Ampere Glass Passivated High Efficiency Rectifiers

### Absolute Maximum Ratings\* $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

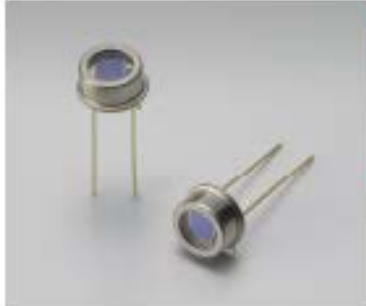
| Symbol                | Parameter                                                                                               | Value       | Units                     |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|
| $I_O$                 | Average Rectified Current<br>.375" lead length @ $T_A = 75^\circ\text{C}$                               | 1.0         | A                         |
| $I_{T(\text{surge})}$ | Peak Forward Surge Current<br>8.3 ms single half-sine-wave<br>Superimposed on rated load (JEDEC method) | 30          | A                         |
| $P_D$                 | Total Device Dissipation<br>Derate above $25^\circ\text{C}$                                             | 2.08<br>17  | W<br>mW/ $^\circ\text{C}$ |
| $R_{\theta JA}$       | Thermal Resistance, Junction to Ambient                                                                 | 60          | $^\circ\text{C/W}$        |
| $R_{\theta JL}$       | Thermal Resistance, Junction to Lead                                                                    | 15          | $^\circ\text{C/W}$        |
| $T_{stg}$             | Storage Temperature Range                                                                               | -65 to +150 | $^\circ\text{C}$          |
| $T_J$                 | Operating Junction Temperature                                                                          | -65 to +150 | $^\circ\text{C}$          |

\* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

### Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Parameter                                                                                               | Device   |      |      |      |      |      |      | Units                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------|
|                                                                                                         | 4001     | 4002 | 4003 | 4004 | 4005 | 4006 | 4007 |                                |
| Peak Repetitive Reverse Voltage                                                                         | 50       | 100  | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 | V                              |
| Maximum RMS Voltage                                                                                     | 35       | 70   | 140  | 280  | 420  | 560  | 700  | V                              |
| DC Reverse Voltage (Rated $V_R$ )                                                                       | 50       | 100  | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 | V                              |
| Maximum Reverse Current<br>@ rated $V_R$ $T_A = 25^{\circ}\text{C}$<br>$T_A = 100^{\circ}\text{C}$      | 10<br>50 |      |      |      |      |      |      | $\mu\text{A}$<br>$\mu\text{A}$ |
| Maximum Reverse Recovery Time<br>$I_F = 0.5\text{ A}$ , $I_R = 1.0\text{ A}$ , $I_{RR} = 0.25\text{ A}$ | 50       |      |      |      | 75   |      |      | nS                             |
| Maximum Forward Voltage @ 1.0 A                                                                         | 1.0      |      |      |      | 1.7  |      |      | V                              |
| Typical Junction Capacitance<br>$V_R = 4.0\text{ V}$ , $f = 1.0\text{ MHz}$                             | 17       |      |      |      |      |      |      | pF                             |

## APÊNDICE G – DATASHEET 1223 3C

**HAMAMATSU**  
 PHOTON IS OUR BUSINESS


## Si PIN photodiodes

S1223 series

**For visible to near IR, precision photometry**

### Features

- High sensitivity in visible to near infrared range
- High reliability
- High-speed response  
S1223:  $f_c = 30$  MHz  
S1223-01:  $f_c = 20$  MHz
- Low capacitance

### Applications

- Optical measurement equipment
- Analytical equipment, etc.

### Structure

| Parameter                     | S1223              | S1223-01  | Unit            |
|-------------------------------|--------------------|-----------|-----------------|
| Dimensional outline           | (1)                | (2)       | -               |
| Window material               | Borosilicate glass |           | -               |
| Package                       | TO-5               |           | -               |
| Photosensitive area size      | 2.4 × 2.8          | 3.6 × 3.6 | mm              |
| Effective photosensitive area | 6.6                | 13        | mm <sup>2</sup> |

### Absolute maximum ratings

| Parameter             | Symbol    | S1223       | S1223-01 | Unit |
|-----------------------|-----------|-------------|----------|------|
| Reverse voltage       | $V_R$ max | 30          |          | V    |
| Power dissipation     | P         | 100         |          | mW   |
| Operating temperature | $T_{opr}$ | -40 to +100 |          | °C   |
| Storage temperature   | $T_{stg}$ | -55 to +125 |          | °C   |

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.

### Electrical and optical characteristics ( $T_a = 25$ °C)

| Parameter                   | Symbol      | Condition                           | S1223 |                       |      | S1223-01 |                       |      | Unit                |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------------|-------|-----------------------|------|----------|-----------------------|------|---------------------|
|                             |             |                                     | Min.  | Typ.                  | Max. | Min.     | Typ.                  | Max. |                     |
| Spectral response range     | $\lambda$   |                                     | -     | 320 to 1100           | -    | -        | 320 to 1100           | -    | nm                  |
| Peak sensitivity wavelength | $\lambda_p$ |                                     | -     | 960                   | -    | -        | 960                   | -    | nm                  |
| Photosensitivity            | S           | $\lambda = \lambda_p$               | -     | 0.6                   | -    | -        | 0.6                   | -    | A/W                 |
|                             |             | $\lambda = 660$ nm                  | -     | 0.45                  | -    | -        | 0.45                  | -    |                     |
|                             |             | $\lambda = 780$ nm                  | -     | 0.52                  | -    | -        | 0.52                  | -    |                     |
|                             |             | $\lambda = 830$ nm                  | -     | 0.54                  | -    | -        | 0.54                  | -    |                     |
| Short circuit current       | $I_{sc}$    | 100 $\mu$ r                         | 5     | 6.3                   | -    | 10       | 13                    | -    | $\mu$ A             |
| Dark current                | $I_D$       | $V_R = 20$ V                        | -     | 0.1                   | 10   | -        | 0.2                   | 10   | nA                  |
| Temp. coefficient of $I_D$  | $TC_{ID}$   |                                     | -     | 1.15                  | -    | -        | 1.15                  | -    | times/°C            |
| Cutoff frequency            | $f_c$       | $V_R = 20$ V, -3 dB                 | -     | 30                    | -    | -        | 20                    | -    | MHz                 |
| Terminal capacitance        | Ct          | $V_R = 20$ V, $f = 1$ MHz           | -     | 10                    | -    | -        | 20                    | -    | pF                  |
| Noise equivalent power      | NEP         | $V_R = 20$ V, $\lambda = \lambda_p$ | -     | $9.4 \times 10^{-13}$ | -    | -        | $1.3 \times 10^{-14}$ | -    | W/Hz <sup>1/2</sup> |

## APÊNDICE H – DATASHEET AD8001



# 800 MHz, 50 mW Current Feedback Amplifier

## AD8001

### FEATURES

Excellent Video Specifications ( $R_L = 150\ \Omega$ ,  $G = +2$ )  
Gain Flatness 0.1 dB to 100 MHz  
0.01% Differential Gain Error  
0.025° Differential Phase Error

### Low Power

5.5 mA Max Power Supply Current (55 mW)

### High Speed and Fast Settling

880 MHz, -3 dB Bandwidth ( $G = +1$ )

440 MHz, -3 dB Bandwidth ( $G = +2$ )

1200 V/ $\mu$ s Slew Rate

10 ns Settling Time to 0.1%

### Low Distortion

-65 dBc THD,  $f_c = 5$  MHz

33 dBm Third Order Intercept,  $F_1 = 10$  MHz

-66 dB SFDR,  $f = 5$  MHz

### High Output Drive

70 mA Output Current

Drives Up to 4 Back-Terminated Loads (75  $\Omega$  Each)

While Maintaining Good Differential Gain/Phase Performance (0.05%/0.25°)

### APPLICATIONS

A-to-D Drivers

Video Line Drivers

Professional Cameras

Video Switchers

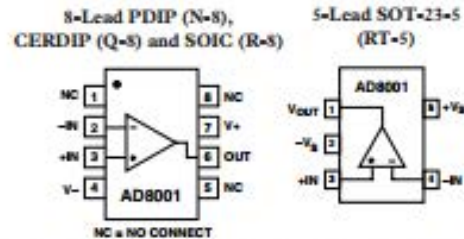
Special Effects

RF Receivers

### GENERAL DESCRIPTION

The AD8001 is a low power, high speed amplifier designed to operate on  $\pm 5$  V supplies. The AD8001 features unique

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS



transimpedance linearization circuitry. This allows it to drive video loads with excellent differential gain and phase performance on only 50 mW of power. The AD8001 is a current feedback amplifier and features gain flatness of 0.1 dB to 100 MHz while offering differential gain and phase error of 0.01% and 0.025°. This makes the AD8001 ideal for professional video electronics such as cameras and video switchers. Additionally, the AD8001's low distortion and fast settling make it ideal for buffer high speed A-to-D converters.

The AD8001 offers low power of 5.5 mA max ( $V_S = \pm 5$  V) and can run on a single +12 V power supply, while being capable of delivering over 70 mA of load current. These features make this amplifier ideal for portable and battery-powered applications where size and power are critical.

The outstanding bandwidth of 800 MHz along with 1200 V/ $\mu$ s of slew rate make the AD8001 useful in many general-purpose high speed applications where dual power supplies of up to  $\pm 6$  V and single supplies from 6 V to 12 V are needed. The AD8001 is available in the industrial temperature range of -40°C to +85°C.

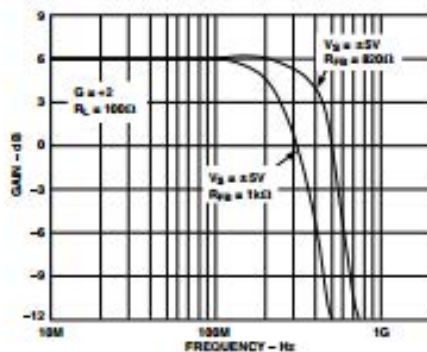


Figure 1. Frequency Response of AD8001

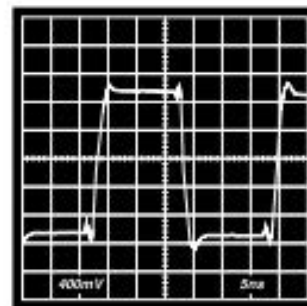


Figure 2. Transient Response of AD8001; 2 V Step,  $G = +2$

### REV. D

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective companies.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781/326-8703 © 2003 Analog Devices, Inc. All rights reserved.