

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

RAFAEL PIRES RIBEIRO

**Desenvolvimento e modelagem de uma fonte de plasma  
intermediário tipo arco deslizante com campo magnético e  
cátodo cilíndrico entalhado**

VITÓRIA

2020

RAFAEL PIRES RIBEIRO

**Desenvolvimento e modelagem de uma fonte de plasma intermediário tipo arco deslizante com campo magnético e cátodo cilíndrico entalhado**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Físicas, com ênfase na área de Física da Matéria Condensada.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gonçalves Cunha.

VITÓRIA

2020

RAFAEL PIRES RIBEIRO

## **Desenvolvimento e modelagem de uma fonte de plasma intermediário tipo arco deslizante com campo magnético e cátodo cilíndrico entalhado**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Físicas, com ênfase na área de Física da Matéria Condensada.

Aprovada em

### Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Alfredo Gonçalves Cunha - UFES - Orientador

---

Prof. Dr. Gilberto Petraconi Filho- DFIS - ITA

---

Prof. Dr. Gustavo Paganini Canal – DFIS - USP

---

Prof. Dr. Davi Cabral Rodrigues – DFIS – UFES

---

Prof. Dr. José Rafael Cápuá Proveti - – DFIS – UFES

À minha esposa Ranneicka e à  
nossa filha Maria Helena, com  
carinho.

## AGRADECIMENTOS

Ao Pai e ao Filho e ao Espírito Santo, à Santíssima Trindade, pelo dom da vida e pela graça de realizar esse trabalho junto de grandes amigos pesquisadores.

À minha esposa Ranneicka e à minha filha Maria Helena, por todo amor, cuidado e carinho durante esse trabalho.

Ao Dr. Alfredo Gonçalves Cunha, pela ideia original do trabalho, pela orientação, pelo suporte concedido, por todo apoio e incentivo.

Ao Dr. Francisco G. Emmerich, por toda ajuda direta na construção e revisão do artigo científico, pelo apoio e incentivo.

Ao Dr. Miguel Ângelo Schettino Jr., pelo auxílio, sugestões e pela ajuda no artigo científico.

Ao Dr. Jair Carlos Checon de Freitas, pelo apoio e incentivo.

Ao Dr. Carlos Gilmar Zucolotto Junior, por toda sua contribuição ao artigo científico.

Ao doutorando Messias Bicalho Cevolani, pela amizade, por todo apoio e incentivo.

Ao graduando Vitor Arantes, por toda sua contribuição ao artigo científico.

Ao Dr. Diego Nunes Faria pela amizade, por todo apoio e incentivo.

Ao Dr. Daniel Fernandes Cipriano pela amizade, por todo apoio e incentivo.

Ao doutorando Joycel Verde Fernández, pela amizade, por todo apoio e incentivo.

Ao Dr. Elhady Khalifa, pela amizade, por todo apoio no artigo científico.

À Dra. Estéfani Pereira Marchiori, por toda sua contribuição ao artigo científico.

Ao Dr. Cássio C. Favarato (mãozinha) pela amizade, por todo apoio e incentivo.

Dr. Aurélio dos Reis Labanca, pela viabilização do projeto em conjunto com a Petrobras.

À Petrobras e à Aneel, pelo financiamento dos projetos desenvolvidos no LPT, que propiciaram todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Às instituições de fomento CNPq, CAPES, FAPES e FINEP, pelo apoio financeiro aos diversos laboratórios envolvidos nesta pesquisa.

À Arcelor Mittal, pelo nitrogênio líquido utilizado para a caracterização do carbono no microscópio eletrônico de varredura.

À Petrobras, que financiou as pesquisas no laboratório.

Ao Programa de Pós-graduação em Física (PPGFis), pela oportunidade desta pós-graduação e por toda instrução ao longo do curso.

Aos colegas do LPT: Isabela Tonon, Guilherme Janoni e Rafael Fricks, por todo incentivo desta pesquisa.

Aos colegas do LMC: Enrique Ocaris, Rafael Oliari, Gustavo, Mariana e demais colegas, por ajudar nas dúvidas e por todo auxílio durante a pesquisa.

Ao secretário da Pós-graduação, José Carlos Coutinho, por toda ajuda e orientação ao longo do curso.

Aos meus parentes e familiares, por todo incentivo e torcida para finalizar este trabalho.

Aos meus amigos da Adoração Jovem: Viviany Nilo, Fábio Moraes, Drielle Brandão, Jailton Chagas e Mirella Gonçalves, pela amizade durante a pesquisa.

E por fim, mais uma vez à Deus, princípio e razão de minha história, a quem deposito toda minha confiança, pela vida, saúde e oportunidade de realizar este trabalho.

“Tenha grande confiança na bondade e na misericórdia de Deus, e Ele nunca o abandonará; mas não negligencie abraçar a Santa Cruz por causa disso!”

“Cada um tem o que espera. Confie em Deus e você já terá muito!”

São Padre Pio de Pietrelcina

## Publicações (Período 2016-2020)

- “Increased arc length and stability in a magnetic gliding arc discharge using a cylindrical notched cathode”. A G Cunha, R P Ribeiro, V A Ribeiro, C G Zucolotto, M B Cevolani, M A Schettino Jr, E A Khalifa, E Marchiori, A R Labanca e F G Emmerich. **Plasma Sources Science and Technology**, 2020.

## RESUMO

O presente trabalho se dedica ao desenvolvimento de um modelo aprimorado de arco deslizante (AD) ou *gliding arc* (GA). O *gliding arc* é um plasma não estacionário, mantido por uma descarga elétrica, que se desenvolve entre dois eletrodos divergentes paralelos; soprado por um fluxo de gás. Pode ser alimentado por uma fonte de tensão contínua ou alternada. O arco elétrico se inicia na região de menor distância entre os eletrodos, com alta corrente elétrica e, à medida que se alonga, diminui a corrente com o aumento da tensão, até a sua interrupção. A seguir, o arco reinicia novamente, estabelecendo-se, assim, um processo repetitivo. Uma versão nova de GA mantém o arco estável com baixa corrente, após este atingir certo comprimento, e usa campo magnético para mover o arco. Esse tipo de plasma foi inicialmente chamado de plasma em disco ou *magnetic gliding arc* (MGA). Este trabalho trata do desenvolvimento e aperfeiçoamento de um *magnetic gliding arc* (MGA), onde foi laborada uma mudança significativa na geometria do cátodo, que permitiu aumentar consideravelmente a estabilidade do arco, atingindo-se comprimento de arco de 40 mm, diâmetro do disco de plasma de 102,0 mm, e corrente  $I$  de 300 a 400 mA. Para a caracterização de giro do arco foi desenvolvido um dispositivo eletro-óptico de baixo custo, usando LDRs, para determinar a frequência  $f$  de giro do arco. Foi deduzida, também, uma equação teórica que interliga  $f$ ,  $I$ , campo magnético  $B$  e o diâmetro  $D$  do cátodo, entre outros parâmetros que podem ser aproximados por um fator aproximadamente constante, usando a frequência medida pelo aparato anterior. A partir dessas variáveis, foi possível obter graficamente um comportamento linear, isto é, uma reta que passa pela origem. Isto torna possível uma representação do comportamento geral experimental de diferentes MGAs, que operam no ar à pressão atmosférica. Os resultados experimentais do MGA desenvolvido se aproximam muito bem do modelo teórico, sendo também possível estimar o diâmetro  $d$  do arco próximo ao cátodo.

## ABSTRACT

The present work is dedicated to the development of an improved model of gliding arc (GA). The gliding arc is a non-stationary plasma, maintained by an electrical discharge, which develops between two parallel divergent electrodes; blown by a gas stream. It can be powered by a DC or alternating voltage source. The electric arc starts in the region of the shortest distance between the electrodes, with high electric current and, as it extends, the current decreases with the increase in voltage, until its interruption. Then, the arc restarts again, thus establishing a repetitive process. A new version of GA keeps the arc stable at low current, after reaching a certain length, and uses a magnetic field to move the arc. This plasma type was initially called plasma disk or magnetic gliding arc (MGA). This work deals with the development and improvement of a magnetic gliding arc (MGA), where a significant change was made in the cathode geometry, which allowed to considerably increase the arc stability, reaching an arc length of 40 mm, plasma disc diameter of 102.0 mm, and currents  $I$  from 300 to 400 mA. For arc rotation characterization, a low-cost electro-optical device was developed, using LDRs, to determine the arc rotation frequency  $f$ . It was also deduced a theoretical equation that links  $f$ ,  $I$ , magnetic field  $B$  and the cathode diameter  $D$ , among other parameters that can be approximated by an approximately constant factor, using the frequency measured by the previous apparatus. From these variables, it was possible to graphically obtain a linear behavior, that is, a line that passes through the origin. This makes it possible to represent the general experimental behavior of different MGAs, which operate in the air at atmospheric pressure. The experimental results of the developed MGA are very close to the theoretical model, and it is also possible to estimate the diameter  $d$  of the arc near the cathode.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DE DESCARGA ELÉTRICA EM TUBO A BAIXA PRESSÃO (ROTH, 1995).	8
FIGURA 2 – TENSÃO-CORRENTE CARACTERÍSTICA DE UMA DESCARGA ELÉTRICA EM TUBO A BAIXA A PRESSÃO (ROTH, 1995) .....	9
FIGURA 3 – DESCARGA CORONA EM UMA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO.....	10
FIGURA 4 – DESCARGA GLOW EM UM REATOR A BAIXA PRESSÃO, DESENVOLVIDO NO LPT (LABORATÓRIO DE PLASMA TÉRMICO), UFES. ....	11
FIGURA 5 – TOCHA DE PLASMA TÉRMICO COM POTÊNCIA DE 80 kW OPERANDO COM ARCO NÃO-TRANSFERIDO CONFINADO POR PAREDE FRIA, DESENVOLVIDA NO LPT, UFES. ...	12
FIGURA 6 – REGIME DE OPERAÇÃO DO ARCO, EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS DO PLASMA COMO FUNÇÃO DA PRESSÃO (ROTH, 1995).....	14
FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO DAS TOCHAS DE PLASMAS QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS DA CURVA TENSÃO-CORRENTE ( $V \times I$ ); A) ASCENDENTE; B) DESCENDENTE E C) DESCENDENTE $D_s$ = ANODO SEGMENTADO, $D_1$ = ANODO RETO, $D_2$ = PRIMEIRO DIÂMETRO DO ANODO EM DEGRAU, $D_3$ = SEGUNDO DIÂMETRO DO ANODO EM DEGRAU, E $G$ = VAZÃO DO GÁS INJETADO NA CÂMARA DE VÓRTICE, $G_1$ = VAZÃO DO GÁS INJETADO NO ANODO SEGMENTADO) (SOLOENKO, 2003; ZHUKOV ET AL., 2007).....	21
FIGURA 8 – TOCHA DE PLASMA TÉRMICO COM CÁTODO DE ZIRCÔNIO, ÂNODO RETO, ARCO NÃO-TRANSFERIDO OPERANDO COM $CO_2$ , DESENVOLVIDA NO LPT, UFES.....	22
FIGURA 9 – IMAGEM DE PLASMA NÃO-TÉRMICO TIPO DBD EM BAIXA PRESSÃO, ENCONTRADA EM GLOBOS DE PLASMA.....	23
FIGURA 10 – ESQUEMA GENERALIZADO DE UM PLASMA INTERMEDIÁRIO MANTIDO POR UM FEIXE DE ELÉTRONS (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).....	25
FIGURA 11 – ESQUEMA GENERALIZADO DE UMA DESCARGA POR MICRO-ONDAS EM UM GUIA DE ONDA. HÁ NÚCLEO MAIS QUENTE E O PLASMA INTERMEDIÁRIO EM TORNO DELE DENTRO DO TUBO (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).....	26

FIGURA 12 – A ESQUERDA, ESQUEMA DE ARCO DESLIZANTE E CIRCUITO ELÉTRICO (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). A DIREITA, FOTO DE UM ARCO DESLIZANTE PRODUZIDO NO LPT, UFES.....	27
FIGURA 13 – DESLOCAMENTO DO ARCO DESLIZANTE DO REGIME TÉRMICO PARA NÃO TÉRMICO; USANDO UMA SEQUÊNCIA DE EXPOSIÇÕES DE FOTOS (FRIDMAN, A', 2008). .....	28
FIGURA 14 – UM OSCILOGRAMA TÍPICO DE TENSÃO-CORRENTE DE ARCO DESLIZANTE (MUTAF-YARDIMCI ET AL., 2000). .....	29
FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO ORIGINAIS DE DUAS PROPOSTAS DE ARCO DESLIZANTE DESENVOLVIDAS POR HERVÉ LESUEUR, ALBIN CZERNICHOWSKI E JOSEPH CHAPELLE, EM 1988 (CZERNICHOWSKI, A., 2001; CZERNICHOWSKI, A', 1994; CZERNICHOWSKI, A ET AL., 1990; LESUEUR; CZERNICHOWSKI; CHAPELLE, 1988).....	30
FIGURA 16 – DESENHO DO REATOR DE PLASMA COM DUPLO ARCO CAMINHANTE: (1) VASO EM AÇO INOX, (2) ELETRODOS, (3) SUPORTE DOS ELETRODOS, (4) ISOLAMENTO TÉRMICO INTERNO, (5) GUIA DA CHAMA, (6) CÂMERA PÓS-DESCARGA E (7) SISTEMA DE INJEÇÃO (PETITPAS ET AL., 2007).....	31
FIGURA 17 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM GERADOR DE ARCO CAMINHANTE AC TRIFÁSICO (LIN ET AL., 2006).....	32
FIGURA 18 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM MGA GERAL USADO. 1: CÁTODO; 2: ÂNODO; 3: IMÃS PERMANENTES; 4: DIREÇÃO E SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO; 5: FIO CONDUTOR RÍGIDO PARA IGNIÇÃO DO ARCO. À ESQUERDA IMAGEM DO PLASMA (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). .....	34
FIGURA 19 –ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL. 1-CÁTODO, 2-ÂNODOS, 3-BOBINA MAGNÉTICA, 4-DIFUSORES, 5-FLANGES, 6-CÂMARA DE DEPOSIÇÕES, 7-JANELA DE VIDRO, 8-SAÍDAS, 9-LENTE, 10-TELAS COM ESTÁGIO DE TRANSLAÇÃO (WANG ET AL., 2018). .....	35
FIGURA 20 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM REATOR DO TIPO DESCARGA DE ARCO DESLIZANTE ROTACIONAL, DESENVOLVIDA POR EUGEN ET AL EM 2002 (HNATIUC ET AL., 2014). .....	36

FIGURA 21 – PLASMA EM DISCO DESENVOLVIDO NO PROJETO ANTERIOR, PLASMA_PGN; 1- CATODO, 2- ÂNODO E 3- ÍMÃS PERMANENTES DE FERRITE. ....	39
FIGURA 22 – PRIMEIRA TENTATIVA DE MONTAR UM MGA USANDO UMA FONTE DE POTÊNCIA MONOFÁSICA.....	40
FIGURA 23 – PLASMA EM DISCO MGA COM DIÂMETRO DE 40 MM USANDO UMA FONTE TRIFÁSICA.....	40
FIGURA 24 – IMAGENS DOS CÁTODOS TESTADOS NO DESENVOLVIMENTO DO MGA AO MGA-CCE: A) PROTÓTIPO 1: CÁTODO COM UMA SUPERFÍCIE COM DUPLO CONE; B) PROTÓTIPO 2: CÁTODO COM UM ENTALHE RELATIVAMENTE PEQUENO EM FORMA DE U; C) PROTÓTIPO 3: CÁTODO COM UM ENTALHE RETANGULAR RELATIVAMENTE PROFUNDO. NA FOTO O CÁTODO ESTÁ SEM A ESPIRAL PARA A IGNIÇÃO INICIAL.....	41
FIGURA 25 – PROTÓTIPO 1 EM UM MGA ONDE O ÂNODO TEM DIÂMETRO INTERNO DE 77 MM. ....	41
FIGURA 26 – A ESQUERDA, O REATOR FECHADO COM O MGA INSTALADO NA PARTE SUPERIOR. O IMÃ FICOU DENTRO DO REATOR, ENVOLTA DO TUBO DE COBRE QUE CONSTITUI O ÂNODO, VISTO NA IMAGEM DA DIREITA COM A TAMPA LATERAL RETIRADA. ....	42
FIGURA 27 – IMAGEM FRONTAL E LATERAL DO PLASMA DE UM MGA DE DUPLO CONE (PROTÓTIPO 1) COM DIÂMETRO DO ÂNODO DE 77 MM, ONDE PODE-SE OBSERVAR AS MUDANÇAS DE POSIÇÃO DO CÁTODO SPOT.....	43
FIGURA 28 – PROTÓTIPO 2 COM UM PEQUENO ENTALHE NA SUPERFÍCIE CILÍNDRICA DO CÁTODO, ONDE SE PODE OBSERVAR O BRILHO DO CÁTODO SPOT NA REGIÃO ENTALHADA DO CÁTODO, INDICANDO UMA MELHOR ESTABILIDADE DO ARCO. ....	43
FIGURA 29 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MGA-CCE DESENVOLVIDO COM O PROTÓTIPO 3, EM QUE O CÁTODO ENTALHADO POSSUI UMA SEÇÃO RETANGULAR. 1: CÁTODO ENTALHADO; 2: ÂNODO; 3: ÍMÃS PERMANENTES; 4: DIREÇÃO E SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO; 5: FIO CONDUTOR RÍGIDO PARA IGNIÇÃO DO ARCO. ....	44
FIGURA 30 – PLASMA DE ARCO DESLIZANTE MAGNÉTICO DESENVOLVIDO COM UM CÁTODO CILÍNDRICO ENTALHADO (MGA-CCE) MONTADO NA TAMPA LATERAL DO REATOR, COM ÂNODO E A BASE CÁTODO REFRIGERADOS COM ÁGUA. 2: ÂNODO; 3: ÍMÃS PERMANENTES; 6: REATOR; O CÁTODO (1), A DIREÇÃO E O SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO (4), E O FIO CONDUTOR RÍGIDO PARA IGNIÇÃO DO ARCO (5) NÃO SÃO MOSTRADOS NESTA FOTO.....	45

FIGURA 31 – FOTO DO DISCO DE PLASMA NO MGA-CCE DESENVOLVIDO (PROTÓTIPO 3), OPERANDO EM AR À PRESSÃO ATMOSFÉRICA E CO <sub>2</sub> COMO GÁS DE TRABALHO. O DIÂMETRO INTERNO DO ÂNODO FOI 102 MM. ....	46
FIGURA 32 – À ESQUERDA, VISTA DO FUNDO DO CANAL DO CÁTODO DO PROTÓTIPO 3 APÓS OS TESTES, MOSTRANDO AS MARCAS PRODUZIDAS PELO PÉ DO ARCO. À DIREITA O PROTÓTIPO 3 COM O FIO CONDUTOR RÍGIDO PARA IGNIÇÃO DO ARCO. ....	46
FIGURA 33 – DESENHO ATUAL DO PLASMA EM DISCO DESENVOLVIDO NO PROJETO. ....	47
FIGURA 34 – DIAGRAMA ELÉTRICO ESQUEMÁTICO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO CONSTRUÍDA. ....	48
FIGURA 35 – PONTO DE OPERAÇÃO DE UMA FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA TOCHAS DE PLASMAS. ....	49
FIGURA 36 – EFEITO DA VAZÃO NO COMPORTAMENTO DA CURVA CARACTERÍSTICA $V_x / I$ DE UM PLASMA TÉRMICO E INTERMEDIÁRIO. ....	49
FIGURA 37 – VISTA GERAL DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO E O REATOR: A – VARIAC; B – TRANSFORMADOR PARA 11 kV COM PONTE RETIFICADORA; RESISTOR DE LASTRO; D – REATOR; MGA E F - MEDIDORES DE CORRENTE.....	50
FIGURA 38 – FOTO DO RESISTOR DE LASTRO DURANTE O FUNCIONAMENTO DO PLASMA. ....	50
FIGURA 39 – POSICIONAMENTO DOS LDRS NO PONTO DE FORMAÇÃO DA IMAGEM DO PLASMA. ....	51
FIGURA 40 – IMAGEM DO LDR USADO. ....	51
FIGURA 41 – CIRCUITO ELÉTRICO PARA MONITORAR O GIRO DO ARCO USANDO LDRs. ....	52
FIGURA 42 – A) VISTA FRONTAL, ONDE APARECEM OS SEIS LDRs; B) VISTA SUPERIOR, ONDE APARECE A BATERIA DE 9,0 V E O REGULADOR DE TENSÃO; C) VISTA INTERNA, LADO ESQUERDO COM O CONECTOR DE SAÍDA, D) VISTA INTERNA LADO DIREITO, COM A PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO ONDE FORAM AFIXADOS OS LDRs.....	53
FIGURA 43 - SEÇÃO DO DISCO DE PLASMA ESCOLHIDA PARA OBSERVAR O ARCO ELÉTRICO.	54
FIGURA 44 – PERFIL DO CAMPO MAGNÉTICO AO LONGO DO RAI, DENTRO DOS TRÊS IMÃS NA REGIÃO DO ARCO ELÉTRICO.....	55

FIGURA 45 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DA TENSÃO X CORRENTE E POTÊNCIA X CORRENTE PARA DOIS VALORES DE VAZÃO DO GÁS DE TRABALHO CO <sub>2</sub> , PARA O MGA-CCE COM DIÂMETRO DO ÂNODO DE 102,0 MM.....	56
FIGURA 46 – COMPORTAMENTO DA TENSÃO EM UM INTERVALO DE 1.00S NO LDR CENTRAL DO DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO DE MEDIR A FREQUÊNCIA.....	57
FIGURA 47 – DETALHE DO COMPORTAMENTO DA TENSÃO NO LDR CENTRAL DO DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO USADO PARA DETERMINAR A FREQUÊNCIA.....	57
FIGURA 48 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) DA TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO, NO RESISTOR DO 3º LDR POR UM INTERVALO DE 1S, PARA O TESTE COM A CORRENTE DE 400 mA.....	58
FIGURA 49 – SEQUÊNCIA DE QUATRO FOTOS CONSECUTIVAS DO ARCO COM INTERVALOS DE 1,7 MS.....	60
FIGURA 50 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE EM UM MGA OBSERVADO POR WANG E COLABORADORES EM 2018 (WANG ET AL., 2018).....	61
FIGURA 51 – FOTO DE UM ÚNICO PERÍODO DO ARCO.....	61
FIGURA 52 – FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO EM FUNÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA DOS MGA DE GANGOLI ET AL, WANG ET AL (WANG ET AL., 2018) E DO PRESENTE TRABALHO....	62
FIGURA 53 – COMPORTAMENTO EM TRÊS DIFERENTES MGA FITADOS COM FUNÇÕES MONOMIAIS DE POTÊNCIA COM DIFERENTES EXPOENTES (“MONOMIAL POWER FUNCTIONS WITH DIFFERENT EXPONENTES”). .....	65
FIGURA 54 – $F D / B^{3/2}$ EM FUNÇÃO DE $I^{1/2}$ PARA TRÊS MGAS DIFERENTES.....	66

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REGIMES DE TENSÃO-CORRENTE DE DESCARGAS ELÉTRICAS DC A BAIXA PRESSÃO.....	8
TABELA 2 - PARÂMETROS DE PLASMAS NÃO-TÉRMICOS (BAIXA INTENSIDADE) E PLASMAS TÉRMICOS (ALTA INTENSIDADE) EM DESCARGA DE ARCO. ..	16
TABELA 3. FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO EM FUNÇÃO DA CORRENTE NO MGA-CCE DESENVOLVIDO.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$T_e$  – temperatura dos elétrons

$T_g$  – temperaturas das partículas pesadas, dos íons

ETT – equilíbrio termodinâmico total

ETL – equilíbrio termodinâmico local

ETLC – equilíbrio termodinâmico local completo

ETLP – equilíbrio termodinâmico local parcial

RF – rádio frequência

DC – *direct current* (corrente contínua)

GA – *gliding arc*

DBD – descarga com barreira dielétrica

AD – arco deslizante

MW – micro-ondas

FVR – fluxo de vórtice reverso

HWHM – *full width at half maximum* (metade da largura total à meia altura)

FFT – *fast fourier transform* (transformada rápida de fourier)

LDR - *light dependent resistor* (resistor dependente de luz)

QPS - Quadros por segundo

LMC – Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos

LPT – Laboratório de Plasma Térmico

CCE – Centro de Ciências Exatas

MGA – *magnetic gliding arc e/ou magnetically stabilized nonequilibrium gliding arc plasma discharge system*

MSGAD – *magnetically stabilized gliding arc discharge*

MGA-CCE – *magnetic gliding arc* – cátodo cilíndrico entalhado

RGA – *rotating gliding arc discharge*

ddp – diferença de potencial

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 O PLASMA.....	3
2.2 MODO DE DESCARGAS OU PLASMAS.....	7
2.3 EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO LOCAL (ETL) .....	12
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PLASMAS .....	14
2.5 REGIMES DO ARCO .....	15
2.6 PLASMAS TÉRMICOS, NÃO-TÉRMICOS E INTERMEDIÁRIOS.....	18
2.6.1 Plasma Térmico .....	20
2.6.2 Plasma Não-Térmico.....	22
2.6.3 Plasma Intermediário.....	23
2.6.3.1 Arco deslizante convencional .....	26
2.6.3.2 Disco de plasma (MGA) .....	33
2.6.3.2 Descarga de arco deslizante rotacional (RGA) .....	36
2.7 OBJETIVO.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 EVOLUÇÃO DO PROJETO ( <i>DESIGN</i> ) PARA ALCANÇAR UM MGA COM UM CÁTODO CILÍNDRICO ENTALHADO (MGA-CCE) .....	39
3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA PLASMAS .....	47
3.3 DISPOSITIVO PARA MEDIR A FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO, E MEDIDAS DE OUTROS PARÂMETROS ELETROMAGNÉTICOS .....	51
3.4 MEDIÇÕES DE TENSÃO, CORRENTE E CAMPO MAGNÉTICO .....	53
3.5 CAMERA DE ALTA VELOCIDADE .....	54

4 RESULTADOS .....	55
4.1 PERFIL DO CAMPO MAGNÉTICO NA REGIÃO DO ARCO ELÉTRICO .....	55
4.2. CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO X CORRENTE.....	56
4.3. FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO ELÉTRICO .....	56
4.4 IMAGENS COM CAMERA DE ALTA VELOCIDADE FASTEC IL3 .....	59
5. DISCUSSÃO .....	62
6 CONCLUSÕES .....	69
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
REFERÊNCIAS.....	71

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Os plasmas não-térmicos têm sido aplicados em tratamento de gás combustível e considerados muito bons promissores para a síntese orgânica devido às suas propriedades de não-equilíbrio, sua baixa necessidade de fonte de potência e sua capacidade de induzir reações físicas e químicas dentro de gases a temperaturas relativamente baixas (PETITPAS et al., 2007).

Os elétrons nos plasmas não-térmicos podem atingir temperaturas de  $10^4$ - $10^5$  K (1-10 eV), enquanto que a temperatura do gás pode permanecer tão baixa quanto à temperatura ambiente. É a temperatura elevada dos elétrons que determina a química incomum de plasmas não-térmicos. Com base nos mecanismos com os quais o plasma é gerado, dependendo da pressão e da geometria dos eletrodos, os plasmas não-térmicos compreendem muitos tipos diferentes de descargas elétricas, incluindo a descarga corona, a descarga silenciosa ou *dielectric barrier discharge* (DBD), a descarga luminescente ou *glow*, a descarga de micro-ondas ou *microwave* (MW) e a descarga de rádio frequência (RF) (PETITPAS et al., 2007). Existem também descargas, com certos parâmetros de plasma, encontradas entre as regiões de descargas térmicas e não-térmicas. A essas descargas denominam-se as descargas intermediárias. Estas devem ser consideradas como **descargas de transição não-térmicas**, em que a temperatura do gás cresce consideravelmente, mas as descargas ainda não se encontram em regime térmico. A temperatura do gás, no caso das descargas intermediárias, é da ordem de 2000-4000 K (0,2 - 0,4 eV), sendo muito menor do que a temperatura do plasma térmico, 10000 K (1 eV). Esses tipos de plasmas incluem os arcos deslizantes (AD) ou *gliding arc* (GA): convencional, plasma em disco ou *magnetic gliding arc* (MGA), tornado (fluxo com vórtice reverso ou *reverse vortex flow*), entre outros similares. O processo de ionização dos gases em descargas de transição é definido majoritariamente por impactos diretos de elétrons e/ou por etapas de ionização de elétrons. O Impacto direto de elétrons envolve a interação de um feixe de elétrons incidente de alta energia e um átomo ou molécula neutra.

Em geral, se o arrefecimento intensivo de qualquer descarga elétrica é compensado pelo aumento da intensidade do campo elétrico, o envolvimento de mecanismos de não-equilíbrio de ionização aumenta. Assim, a fim de obter mais condições de não-equilíbrio na descarga de arco, é necessário aumentar o arrefecimento da descarga, sem um aumento na intensidade de corrente elétrica. Esta é a razão pela qual o *gliding arc* com arrefecimento por convecção sofre grandes variações de regime quando comparado com um arco sem refrigeração forçada; com a mesma corrente. O GA de baixa corrente é, portanto, um bom exemplo de uma descarga de transição, de forma a obter características semelhantes a das descargas térmicas e não-térmicas: alta densidade do plasma, alta potência e pressão de operação elevada (típica para sistemas de plasma térmico) e um alto nível de não-equilíbrio, alta temperatura de elétrons, temperatura intermediária do gás, resultando na possibilidade de estimular os processos químicos seletivos, sem a necessidade de *quenching* (arrefecimento) (típica para sistemas de plasma não-térmicos). Estas propriedades de descargas de transição do arco deslizante tornam-se atraentes para muitas aplicações industriais (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).

Devido à divulgação ostensiva das vantagens dos plasmas intermediários baseados em arco deslizante, foi decidido estudar esses modelos para testar sua eficiência.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O PLASMA

Os estados físicos da matéria mais conhecidos, em nosso cotidiano, são: sólido, líquido e gasoso. Observa-se isto, pelo fato de encontrarmos, facilmente, fenômenos relativos a esses estados. Entretanto, existe outro estado da matéria, que passa por despercebido pelas pessoas, mas que representa, por excelência, o estado físico mais abundante do universo conhecido: o plasma. Os plasmas compõem mais de 99% da matéria visível no universo conhecido.

A matéria ordinária (*normal matter*) é formada por átomos, que por sua vez são constituídos de partículas (prótons, nêutrons e elétrons). Para que ocorra a mudança de fase das diversas substâncias ou materiais, é necessária uma quantidade de energia suficiente, que depende do calor específico e do calor latente das mesmas e das condições de temperatura e pressão, capazes de alterar sua estrutura física e geométrica. Na medida em que uma substância passa de sólido para líquido e de líquido para gasoso, a quantidade de energia necessária para o processo aumenta. Subsequentemente, um plasma será produzido quando uma quantidade significativa e suficiente de energia for aplicada ao gás. Através de certos mecanismos, tais como, uma descarga elétrica ou rádio frequência, elétrons são arrancados dos átomos gerando íons, quando aplicada em gases e líquidos. Dessa forma, os elétrons que escapam dos átomos ou moléculas, não só permitem que os íons se movam mais livremente, mas também, produzem ainda mais elétrons e íons através de colisões, após serem acelerados rapidamente em um campo elétrico. Consequentemente, o maior número de elétrons e íons alteram as propriedades elétricas e magnéticas do gás, tornando-o, assim, gás ionizado ou plasma (CHU; LU, 2014). O termo "ionizado" significa que pelo menos um elétron (carga negativa) não está ligado a um átomo ou molécula. Os átomos ou moléculas se tornam íons carregados positivamente, criando assim, o par de partículas carregadas, elétron e íon (FRIDMAN, A', 2008).

Quando um gás neutro é ionizado, ele se comporta como um meio condutor. As propriedades elétricas dependem da densidade das partículas carregadas. Uma das mais importantes distinções entre um gás ionizado e um gás neutro é que a

interação coulombiana entre as partículas carregadas determina a dinâmica do gás (KEIDAR; BEILIS, 2013).

A propriedade de conduzir eletricidade é, em particular, de grande interesse quando na presença do campo magnético, uma vez que a interação entre a corrente e o campo magnético produz forças eletromagnéticas nos íons (e nos elétrons), alterando assim, o fluxo dinâmico do gás. Há gases ionizados fracamente e gases ionizados fortemente. Geralmente, um gás fracamente ionizado é caracterizado por uma fração relativamente pequena de partículas carregadas e seu comportamento pode ser amplamente descrito por leis dos gases neutros, enquanto que, é preciso utilizar a eletrodinâmica para descrever adequadamente um meio fortemente ionizado. O estado físico (gás ionizado) em que as densidades de partículas carregadas positiva e negativamente são aproximadamente iguais é chamado de um estado de quase-neutralidade. Ou seja, o plasma foi definido como um gás ionizado que satisfaz a condição de quase-neutralidade (KEIDAR; BEILIS, 2013).

O estudo dos plasmas se iniciou no século XVII. Plasmas naturais, como raios e luzes polares, vento solar, e ionosfera da Terra são, desde então, frequentemente observados e têm intrigado as pessoas por muitos séculos. O desejo de se compreender o mecanismo que governa a geração de plasmas levou à invenção do dispositivo de descarga pelos primeiros investigadores (CHU; LU, 2014).

O desenvolvimento da física dos plasmas foi sempre associado a aplicações específicas, como fontes de iluminação, interruptores de corrente, fusão termonuclear, e aceleradores de partículas. Hoje em dia é comum encontrar estudos de plasma em diversas aplicações tecnológicas como propulsão espacial, nanotecnologia e medicina (KEIDAR; BEILIS, 2013).

O atrito entre determinados materiais pode produzir descargas elétricas, e isto já era observado primordialmente por filósofos gregos. Entretanto, o mecanismo de produção dos plasmas não foi compreendido até o século XVII. Um dos primeiros dispositivos de descarga conhecido foi elaborado por Anders. O aparelho consistiu em uma esfera de vidro, que pode ser girada rapidamente em um eixo por uma grande roda. O eixo era oco, ligando o globo através de uma válvula, que tinha na outra extremidade, a uma bomba de vácuo. A esfera era iluminada quando girada no escuro. Mais tarde, os fenômenos da eletricidade estática e descarga se tornaram

objetos de estudo. Em 1734, Priestley descreveu um "lápis de luz elétrica", hoje conhecido como descarga corona. Nesta época, observou-se também, um progresso significativo no desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de carga elétrica, tais como a garrafa de Leyden, permitindo estudar as descargas com centelhas (*spark discharge*). Este dispositivo era constituído por dois eletrodos metálicos e um dispositivo de armazenamento de carga. Após ser carregada, a ligação em curto-circuito entre os dois eletrodos provocava uma centelha, devido ao reequilíbrio da carga armazenada. Mais tarde, em 1800, uma bateria eletroquímica foi inventada por Volta, e foi usada por Petrov para produzir a descarga de arco contínuo em 1803.

Durante o século XIX, entre 1831-1835, foram desenvolvidos diversos dispositivos de armazenamento de energia elétrica e de vácuo, o que permitiu que Faraday desenvolvesse a descarga luminescente (*glow*) com corrente contínua (DC) através da aplicação de tensões de até 1000 V em um tubo de vácuo (aproximadamente 1 Torr  $\sim$  0,0013 atm). Este tipo de descarga foi o precursor do plasma a vácuo de hoje. O plasma foi identificado pela primeira vez como matéria radiante por Sir William Crookes, em 1879. A compreensão significativa sobre descargas em gases foi atingida entre a segunda metade do século XIX e início do século XX, quando J. Townsend estudou a descarga de gás usando um campo elétrico uniforme, desenvolvendo a teoria de descarga *Townsend*, estruturando as bases modernas das pesquisas de plasma. Sua contribuição também incluiu as descobertas de seções transversais de várias colisões elétron-átomo, velocidades de deriva dos portadores de carga (elétrons e íons), e seus coeficientes de recombinação (CHU; LU, 2014).

O termo plasma foi introduzido pela primeira vez por Irving Langmuir em 1928. Nesta ocasião, a forte interação dos multicomponentes do gás ionizado o lembrou do plasma sanguíneo. Segundo o artigo de Mott-Smith, Langmuir toma o termo por analogia entre o "gás multicomponente ionizado e o plasma sanguíneo que carrega em volta corpúsculos e glóbulos vermelhos e brancos".

Irving Langmuir escreveu:

"A não ser perto dos eletrodos, onde há bainhas contendo muito poucos elétrons, o gás ionizado contém íons e elétrons em números aproximadamente iguais, de modo que a carga

espacial resultante é muito pequena. Vamos usar o nome de plasma para descrever esta região contendo cargas equilibradas de íons e elétrons" (FRIDMAN, A', 2008).

Mais tarde, Langmuir contribuiu também com a invenção da sonda de Langmuir para obtenção da temperatura eletrônica, densidade de elétrons e potencial elétrico de um plasma. Irving Langmuir recebeu o Prêmio Nobel de Química de 1932. O desenvolvimento na ciência de plasmas teve a participação importante de outros cientistas como Compton, Tonks, Mott-Smith, Jones, Child, e Taylor (KEIDAR; BEILIS, 2013).

O século XX testemunhou um rápido progresso no desenvolvimento, diagnóstico e aplicações de plasmas. Plasmas de radiofrequência (RF) e baixa-pressão, produzidos em uma câmara de vácuo estão sendo usados de forma intensiva no processamento básico, bem como para a deposição e corrosão, na indústria de semicondutores, desde 1970. Desde os anos 1990, a aplicação de plasmas à pressão atmosférica, eliminou a necessidade de sistemas com câmara de vácuo e de bombeamentos caros e, como tal, os plasmas à pressão atmosférica estão sendo largamente usados em aplicações ambientais, na modificação da superfície de materiais, aplicações biomédicas, e assim por diante (CHU; LU, 2014).

Hannes Alfven (1908-1995) é amplamente conhecido, como pai da magneto-hidrodinâmica de plasmas. Ele desenvolveu teorias sobre a natureza do campo magnético galáctico e plasmas do espaço. O Prof. Alfven recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1970 por "Trabalho fundamental e descobertas em magneto-hidrodinâmica". A física de plasmas, como é conhecida hoje, foi desenvolvida ao longo de 50 anos e abrange muitas áreas, que vai desde os de alta-temperatura, caso da fusão termonuclear, até o plasma de baixa-temperatura, usado no processamento de materiais. Os fundamentos e configurações para aplicações da fusão termonuclear de plasmas foram formulados e desenvolvidos por Igor Tamm, Andrei Sakharov, Lev Artzimovich, Marshall Rosenbluth, Lyman Spitzer, e muitos outros. A ciência do meio interestelar ionizado e plasmas de astrofísica foram por Yakov Zeldovich e Vitaly Ginsburg. A descarga em gás na física de plasmas foi introduzida por A. von Engel, M. Steenbeck, e depois desenvolvida por Loeb, Townsend, Thomson, Kaptzov, Granovsky, e Raizer (KEIDAR; BEILIS, 2013).

Plasmas podem ser eficazmente criados em laboratório e na indústria, pois oferecem oportunidades para inúmeras aplicações, incluindo a fusão termonuclear, eletrônica, lasers, lâmpadas fluorescentes e muitos outros. Para ser mais específica, a maioria dos hardwares de computadores e de telefones celulares são feitos com base em tecnologias de plasmas, além das TVs de plasma. Dessa forma, a física de plasmas hoje, é uma área em rápida expansão da ciência e da engenharia, com aplicações amplamente difundidas a partir de micro fabricação em eletrônica, revestimentos de proteção para aeronaves, tratamento de fibras poliméricas e filmes, cauterização médica para parar sangramentos e tratamento de feridas, produção de ozônio e TVs de plasma (FRIDMAN, A', 2008).

## 2.2 MODO DE DESCARGAS OU PLASMAS

De acordo com as características de tensão e corrente, a descarga elétrica é definida de forma diferente, onde resulta em vários modos ou regimes de descargas que serão abordados aqui. Inicialmente, a maioria das pesquisas em física sobre descargas elétricas foram realizadas dentro de um tubo de vidro em baixa pressão, como ilustra a Figura 1. Este arranjo foi o protótipo dos painéis de propaganda 'neon' e das lâmpadas fluorescentes. É composto por um tubo de vidro em vácuo, com dois eletrodos na forma de discos circulares (em ambas as extremidades), ligados através do resistor de lastro  $R$  (*ballast resistor*) a uma fonte de alimentação de alta tensão DC (*direct current*). Ao variar a resistência do resistor de lastro, pode-se levantar a curva característica tensão-corrente do plasma, que é altamente não linear. Nos plasmas em geral, os elétrons migram para o ânodo (eletrodo positivo) e os íons positivos se movem em direção ao cátodo (eletrodo negativo), ambos frequentemente colidindo com o gás neutro de fundo (ROTH, 1995).

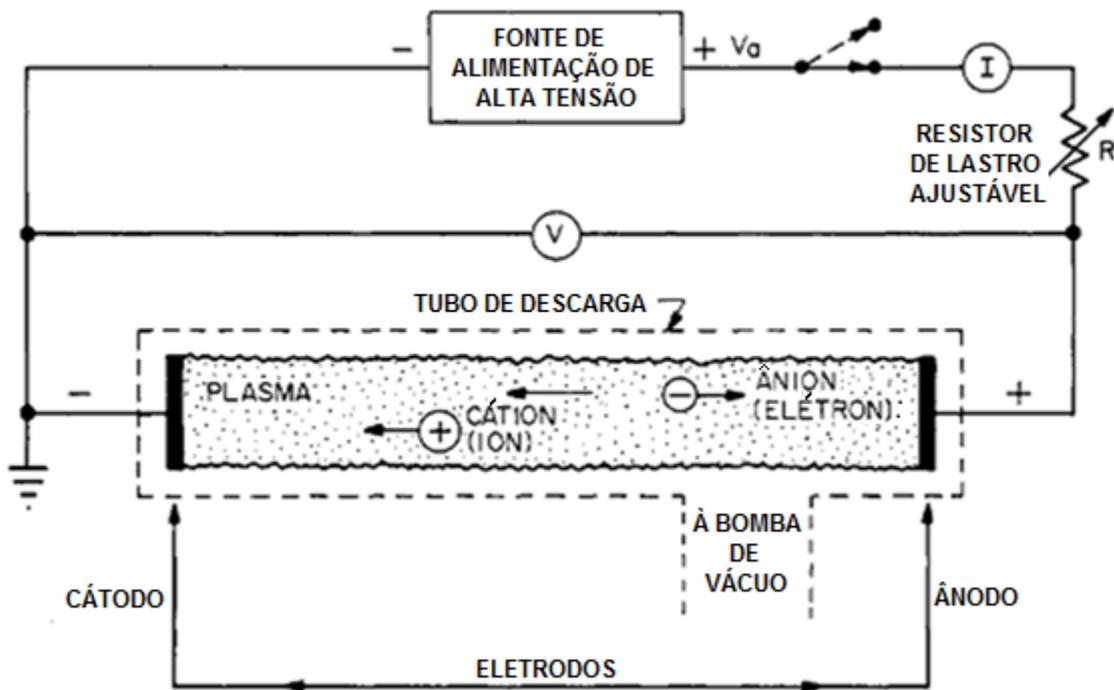


Figura 1 – Esquema de descarga elétrica em tubo a baixa pressão (ROTH, 1995).

Os regimes de tensão-corrente de uma descarga elétrica DC de baixa pressão são listados na TABELA 1, e podem ser ilustrados, esquematicamente, pelo diagrama da tensão-corrente, mostrado na Figura 2.

TABELA 1 - REGIMES DE TENSÃO-CORRENTE DE DESCARGAS ELÉTRICAS DC A BAIXA PRESSÃO

(1) DESCARGAS DARK	(2) DESCARGAS GLOW	(3) DESCARGAS ARCO
(A-B) Ionização de <i>background</i>	(E-F)* Transição <i>dark-glow</i>	(H-J) Transição de <i>glow</i> -arco
(B-C) Regime de saturação	(F-G) Descarga <i>glow</i> normal	(J-K) Arcos não-térmicos
(C-E) Regime de <i>Townsend</i>	(G-H) Descarga <i>glow</i> anormal	(K-I) Arcos térmicos
(D-E) Descargas corona		
(E) Tensão de <i>breakdown</i>		

\*(F'-D) Transição *glow-dark* (de retorno)

Fonte: (ROTH, 1995)

Considerando um experimento com descarga em baixa pressão, ao aumentar a diferença de potencial  $V$  entre os eletrodos, via mudança da resistência de lastro, e

enquanto se mede a corrente  $I$  que flui pelo circuito, a descarga traçará uma curva extremamente não-linear, representado esquematicamente na Figura 2.

Iniciando com uma voltagem muito baixa, no canto inferior esquerdo, a região entre A e B na curva representa o regime de ionização de fundo ou *background*, em que o aumento da tensão desloca cada vez mais frações dos íons e elétrons individuais criados por raios cósmicos e outras formas de radiação ionizante de fundo.

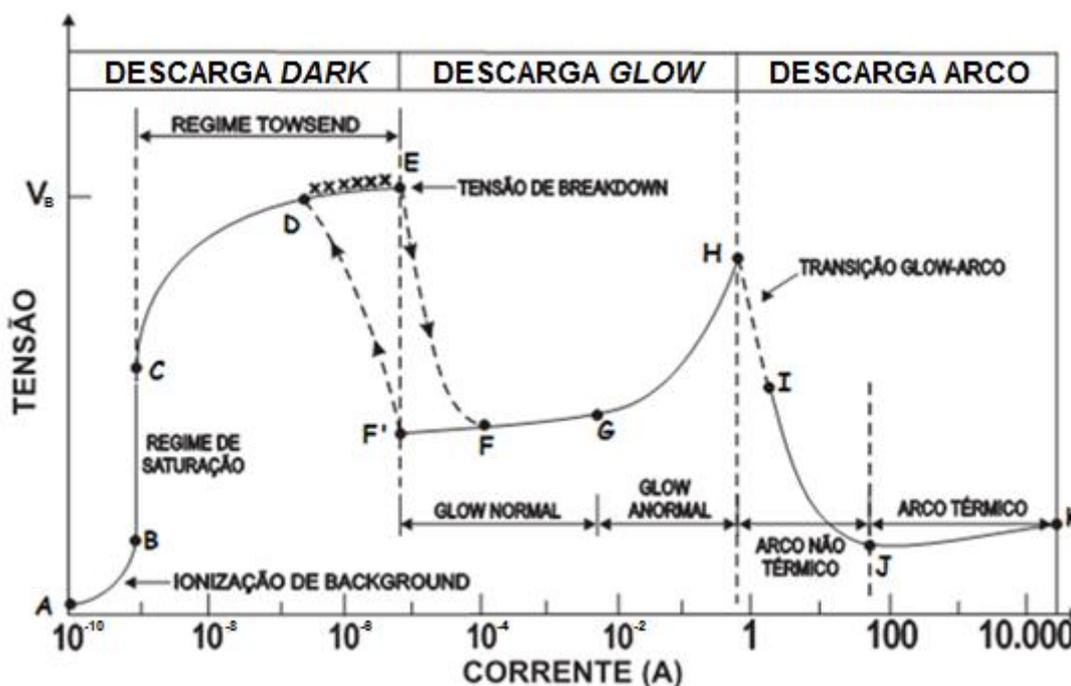


Figura 2 – Tensão-Corrente característica de uma descarga elétrica em tubo a baixa a pressão (ROTH, 1995)

No regime de saturação, entre B e C, todos os íons e elétrons produzidos pela radiação de fundo já foram removidos do volume de descarga, e os elétrons não possuem a energia suficiente para criar nova ionização. Na região de C a E, chamada regime de *Townsend*, os elétrons no volume de descarga adquirem energia cinética suficiente, do campo elétrico, para ionizar alguns átomos neutros do gás, fazendo aumentar exponencialmente o número de portadores de corrente elétrica, que faz aumentar a condutividade do gás, conduzindo a um rápido aumento da corrente em função da tensão.

Na região entre D e E, surgem as descargas corona, mais intenso no polo positivo, como resultado das concentrações do campo elétrico local sobre a superfície dos

eletrodos com pontas afiadas, pontas vivas, ou ásperas. A Figura 3 mostra um tipo de descarga corona que ocorre em linhas de transmissão.



Figura 3 – Descarga corona em uma rede elétrica de alta tensão.

Estes fortes campos elétricos locais ultrapassam a rigidez dielétrica do gás neutro circundante. Quando a tensão é aumentada ainda mais, alcança a chamada tensão  $V_B$  de ruptura ou *breakdown*, no ponto E, onde ocorrerá a ruptura dielétrica do meio. Com isso, elétrons são arrancados dos átomos do gás pelo forte campo elétrico existente. O regime entre A e E, na curva característica tensão-corrente, é denominado descarga escura ou *dark*, porque, com exceção das descargas corona e da própria descarga centelha (*spark*) na ruptura dielétrica, a descarga permanece imperceptível a olho nu. Uma vez que ocorre ruptura elétrica no ponto E, a descarga faz uma transição para o regime de descarga luminescente ou *glow*, na qual a corrente é suficientemente alta, e a quantidade de excitação do gás neutro de fundo é suficientemente grande. Isto faz com que boa parte da energia seja liberada em forma de radiação, tornando assim, o plasma visível a olho nu. A Figura 4 mostra um exemplo de descarga *glow* produzido em nosso laboratório.



Figura 4 – Descarga *glow* em um reator a baixa pressão, desenvolvido no LPT (Laboratório de Plasma Térmico), UFES.

Após uma transição descontínua a partir do ponto E para F, encontra-se a região *glow* normal da curva característica tensão-corrente, onde a diferença de potencial entre os eletrodos é quase independente da corrente para várias ordens de grandeza. Como a corrente aumenta a partir de F a G, a fração do cátodo ocupado pelo plasma aumenta, até que o plasma envolva toda a superfície do cátodo no ponto G. Neste ponto, a descarga entra no regime de *glow* anormal de G a H, em que a tensão é uma função crescente da corrente. Nesta região, o campo magnético gerado pelo aumento da corrente começa a comprimir o plasma, de modo a diminuir o seu diâmetro e aumentar a densidade de corrente. Consequentemente, a coluna de plasma tem sua temperatura elevada, correspondendo a um aumento da resistividade do gás, devido à alta agitação térmica.

A partir do ponto H, a temperatura do gás é alta o suficiente para que o processo de ionização prevaleça sobre a agitação térmica, sendo mais intensa a produção de portadores de corrente, que fazem a resistência do plasma diminuir. Isso desencadeia, assim, uma transição descontínua *glow* para arco, mostrado pela linha tracejada entre H e I. Após o início desta transição, a diferença de potencial entre os eletrodos deve diminuir. O regime de arco, a partir de I a K, é aquele em que a tensão de descarga diminui à medida que a corrente aumenta, até que grandes correntes sejam alcançadas. Neste processo inicial, o arco se encontra no regime

não-térmico, mais especificamente na região entre I e J. No ponto J, quase todos os átomos atingiram o seu primeiro grau de ionização através do aumento do número de portadores e a diminuição da resistividade do plasma. Do ponto J ao K, o aumento da agitação térmica, que é predominante em relação ao início do segundo grau de ionização dos íons, faz aumentar a resistência do plasma, provocando, por conseguinte, um aumento gradual na curva tensão x corrente. A porção com inclinação positiva entre J e K representa o regime de arco térmico, em que o plasma está próximo do equilíbrio termodinâmico local e as temperaturas de todas as espécies químicas são aproximadamente iguais (ROTH, 1995). A Figura 5 mostra uma tocha de plasma térmico de 80 kW que opera com arco não-transferido confinado por parede fria, desenvolvida em nosso laboratório.



Figura 5 – Tocha de plasma térmico com potência de 80 kW operando com arco não-transferido confinado por parede fria, desenvolvida no LPT, UFES.

### 2.3 EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO LOCAL (ETL)

Quando se desenvolvem plasmas em laboratório, várias propriedades importantes, principalmente termodinâmicas, devem ser levadas em consideração, tais como: a temperatura, a pressão, a densidade de partículas, a radiação, entre outros. O equilíbrio termodinâmico total (ETT) não ocorre em laboratório, pois seria necessário que as dimensões do plasma fossem muito grandes ou que as paredes do reservatório estivessem na mesma temperatura do plasma. Essencialmente, a

condição para que o plasma esteja em equilíbrio termodinâmico é que a temperatura  $T_e$  dos elétrons seja igual, em boa aproximação, à temperatura  $T_g$  dos íons (partículas pesadas), ou seja,  $T_e \approx T_g$  (ANGELES, 2003). Assim, não existe material conhecido capaz de suportar temperaturas muito altas. Além disso, a maioria dos plasmas de laboratório é opticamente fino (transparente), ou seja, a radiação do plasma não satisfaz a lei de Planck de radiação em equilíbrio ou radiação de corpo negro (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994). Além das perdas por radiação, os plasmas sofrem perdas irreversíveis de energia por condução, convecção e difusão, o que perturba o equilíbrio termodinâmico. Assim, os plasmas de laboratório e alguns plasmas naturais não podem estar em equilíbrio termodinâmico total (ETT) e se faz necessário introduzir um novo tipo de equilíbrio, o equilíbrio termodinâmico local (ETL) (ANGELES, 2003). O ETL em um plasma opticamente fino e estacionário existirá se o plasma satisfizer, simultaneamente, as condições abaixo (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994):

1. As diferentes espécies que formam o plasma (elétrons e íons) devem ter uma distribuição maxwelliana de energia;
2.  $E/p$  seja suficientemente pequeno ( $E$ : campo elétrico e  $p$ : pressão) e a temperatura seja suficientemente alta para que  $T_e \approx T_g$ ;
3. O ETL existe em uma região suficientemente pequena do plasma, contendo grande número de partículas. Assim o plasma em ETL pode ter gradientes de temperatura e localmente estar em equilíbrio;
4. O processo colisional é o mecanismo dominante para a excitação (distribuição de Boltzmann), ionização (equilíbrio Saha) e é responsável pelas distribuições de densidades populacionais;
5. As variações espaciais das propriedades dos plasmas (temperatura, densidade, condutividade térmica, etc.) são suficientemente pequenas (ANGELES, 2003).

A Figura 6 apresenta o comportamento do arco elétrico em função da pressão, mostrando o comportamento da temperatura  $T_e$  dos elétrons e  $T_g$  das partículas pesadas. A partir disso, pode-se observar o conceito de equilíbrio termodinâmico local (ETL). Com o aumento da pressão há a diminuição do livre caminho médio entre os elétrons e íons, o que facilita o equilíbrio de temperatura entre as partículas,

pois a entrada de energia em um plasma se dá geralmente pelo aumento da energia cinética dos elétrons via campo elétrico.

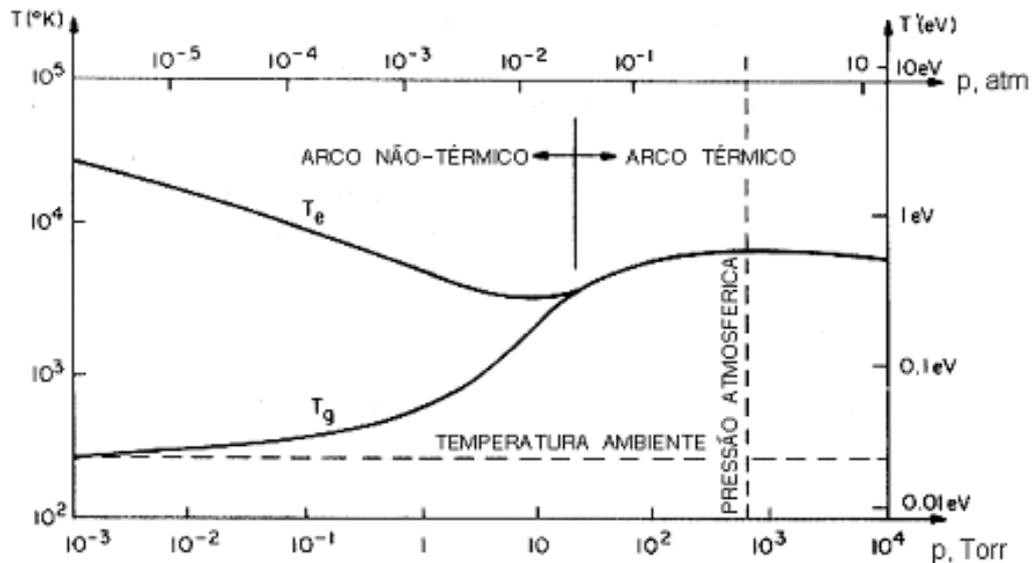


Figura 6 – Regime de operação do arco, evolução da temperatura das partículas do plasma como função da pressão (ROTH, 1995)

Como pode ser observado, geralmente, a pressões atmosféricas, o plasma é térmico, enquanto que em baixas pressões, o plasma se encontra fora do equilíbrio, sendo não-térmico. Existem, no entanto, outros tipos de descargas que não a de arco (anormal, barreira capacitiva, etc.) em que, apesar de estar em alta pressão, é possível o plasma estar fora do equilíbrio termodinâmico local (ZUCOLOTTO, 2006).

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PLASMAS

Os plasmas são classificados em dois tipos de acordo com sua temperatura: plasma de alta temperatura e plasma de baixa temperatura. O primeiro tipo abrange plasmas de grande importância na área de fusão termonuclear controlada, onde sua temperatura excede os 70000 K. Na natureza, plasmas deste tipo podem ser encontrados em estrelas como o sol. Os plasmas de baixa temperatura apresentam temperaturas no intervalo de 2000 a 50000 K, onde se dividem em três categorias, plasmas térmicos, não-térmicos (chamado de frios) e intermediários. Vê-se que apesar do plasma ser considerado plasma de baixa temperatura, sua temperatura chega aos 50000 K. A característica fundamental dos plasmas térmicos é dada pela

temperatura dos elétrons serem iguais (em boa aproximação) à temperatura das partículas pesadas ( $T_e \approx T_g$ ), associadas à cinética das partículas. A este tipo de plasma diz-se que está em equilíbrio termodinâmico local (ETL). Um dos exemplos é encontrado em plasmas térmicos de arco elétrico.

Por definição, os plasmas térmicos estão dentro ou perto de ETL, entretanto, tornou-se cada vez mais claro que a existência de ETL nos plasmas térmicos é a exceção e não a regra. Muitos plasmas classificados como plasmas térmicos não atendem a todos os requisitos para ETL, ou seja, eles não estão em equilíbrio termodinâmico local completo (ETLC). Uma das principais razões para os desvios do ETLC é a falta do equilíbrio da excitação (distribuição de Boltzmann). Devido à pequena contribuição de espécies excitadas para a entalpia do plasma, esse tipo de desvio do ETLC é irrelevante para a maioria das aplicações de engenharia. Por esse motivo, esses plasmas ainda são tratados como plasmas térmicos ou, mais precisamente, como plasmas em equilíbrio termodinâmico local parcial (ETLP) (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 2016).

Agora, plasmas não-térmicos, possuem as partículas pesadas  $T_g$  próximas à temperatura ambiente, logo, são descritos pelo não equilíbrio termodinâmico local ( $T_e \gg T_g$ ). Um dos exemplos mais comuns é o da lâmpada fluorescente (ZUCOLOTTO, 2006). O plasma intermediário se inicia entre a região mais próxima entre dois eletrodos e, depois, migra para regiões mais afastadas dos mesmos. Assim, a corrente inicial é alta e diminui ao mesmo tempo em que o arco se alonga, ou seja, se desloca por entre os eletrodos. Dessa forma, pode-se afirmar que o plasma intermediário começa no regime térmico e migra para o não-térmico (FRIDMAN, A', 2008).

## 2.5 REGIMES DO ARCO

Quando uma descarga elétrica DC possui correntes da ordem de 1 a 10 A, a baixas pressões, às vezes é difícil distinguir se isso se trata de um arco ou de uma descarga luminescente (*glow*). Uma descarga de arco é definida em termos de sua luminosidade, densidade de corrente e queda de tensão do cátodo. Um arco, ao invés de uma descarga *glow*, é altamente luminoso, especialmente os arcos térmicos de alta intensidade. Arcos também são caracterizados por altas correntes e

densidades de corrente. Mesmo arcos de baixas intensidades raramente têm no total correntes menores que 1 A. As densidades de corrente em arcos variam de vários amperes por centímetro quadrado para mais de mil amperes por centímetro quadrado. Estas densidades de corrente contrastam com aquelas de descargas *glow*, em que as densidades de corrente são raramente superiores a 50 mA / cm<sup>2</sup> (ROTH, 1995).

Arcos são também caracterizados por uma queda relativamente pequena da diferença de potencial na região do cátodo, de cerca de 10 V ou menos, na região dos elevados gradientes espaciais e dentro de alguns milímetros do cátodo. Em contraste, as descargas *glow* tipicamente têm uma queda de tensão no cátodo maior que 100 V, ao longo de uma distância de mais de um centímetro. A corrente total presente em uma descarga elétrica não possui uma faixa de valores bem definida, uma vez que os arcos podem ser mantidos em correntes de 1 A ou menos, ao passo que as descargas *glow*, se tiverem superfícies do eletrodo suficientemente grandes, podem gerar 10 A ou mais.

Os parâmetros de plasmas não-térmicos (baixa intensidade) e plasmas térmicos (alta intensidade) em descarga de arco são mostrados na TABELA 2 (ROTH, 1995). A literatura de arco existente é de fácil confusão quanto à terminologia, incluindo nomes diferentes para os mesmos fenômenos, e os mesmos nomes para fenômenos ou divisões do regime de arco, que são definidos de forma diferente por vários autores.

TABELA 2 - PARÂMETROS DE PLASMAS NÃO-TÉRMICOS E PLASMAS TÉRMICOS EM DESCARGA DE ARCO.

<b>Parâmetro de Plasma</b>	<b>Arco não-térmico</b>	<b>Arco térmico</b>
Estado de equilíbrio	Cinético	ETL
Densidade eletrônica, $n_e$ (elétrons/m <sup>3</sup> )	$10^{20} < n_e < 10^{21}$	$10^{22} < n_e < 10^{25}$
Pressão do gás, $p$ (Pa)	$0,1 < p < 10^5$	$10^4 < p < 10^7$
Temperatura dos elétrons, $T'_e$ (eV)	$0,2 < T'_e < 2,0$	$0,1 < T'_e < 10$
Temperatura do gás, $T'_g$ (eV)	$0,025 < T'_g < 0,5$	$T'_g = T'_e$
Corrente de arco, $I$ (A)	$1 < I < 50$	$50 < I < 10^4$

$E/p$ (V/m-Torr)	Alto	Baixo
$IE$ (kW/cm)	$IE < 1,0$	$IE > 1,0$
Emissão típica do cátodo	Termiônico	Campo
Intensidade luminosa	Brilhante	Deslumbrante
Transparência	Transparente	Opaco
Fração de ionização	Indeterminado	Equação de Saha
Radiação de saída	Indeterminado	ETL

Fonte: (ROTH, 1995)

Também, na literatura, o que aqui chamamos de arcos não-térmicos ou de baixa intensidade são algumas vezes chamados de termiônico ou arco de baixa pressão, e vários autores têm levemente diferentes definições do limite de divisão relevante. Da mesma forma, o térmico, arco de alta intensidade, é algumas vezes chamado de emissão de campo ou arco de alta pressão. Na fronteira comum das divisões mostradas na TABELA 2, a distinção entre arcos não-térmico e térmico, em uma determinada aplicação, pode não se aplicar a todos os parâmetros.

Os arcos não-térmicos de baixa intensidade são difíceis de serem descritos teoricamente ou modelados computacionalmente, pois estão em equilíbrio cinético na melhor das hipóteses, e não se pode assumir equilíbrio termodinâmico local (ETL), apropriado para arcos térmicos de alta intensidade. A menos que um arco esteja em equilíbrio termodinâmico local, não se pode, com confiança, analisar qualquer fração ionizada utilizando a equação de Saha (ROTH, 1995), a fração relativa de átomos em estados excitados, ou o transporte de radiação dentro do arco com base no equilíbrio termodinâmico e a lei de radiação de Stefan-Boltzmann. A densidade numérica de elétrons em arcos térmicos e em arcos de alta intensidade é, com raras exceções, maior do que a dos arcos não-térmicos e arcos de baixa intensidade. A pressão do gás não é um determinante definitivo das divisões do arco térmico versus o não-térmico. Os valores apresentados na TABELA 2 destinam-se a ser representativos, e que é possível operar arcos perto de 1 atm, mesmo não estando em ETL.

A temperatura cinética eletrônica também não é uma característica definitiva do regime de arco. Arcos não-térmicos podem ter temperaturas dos elétrons variando

pelo menos em uma ordem de grandeza. Na temperatura dos elétrons de arco térmico, arcos de alta intensidade tendem a ser da ordem de 1 eV, a correntes de cerca de 50 A ou ligeiramente superior, e a aumentar lentamente com a entrada de energia para se aproximar de temperaturas cinéticas de 10 eV, em arcos que dissipam muitos megawatts por metro de comprimento (ROTH, 1995). A relação entre a temperatura cinética eletrônica e a temperatura do gás é uma característica definitiva da divisão do arco. Característico dos arcos térmicos, um requisito importante do equilíbrio termodinâmico local (ETL), é que as temperaturas dos elétrons e dos gases cinéticos sejam aproximadamente iguais, em boa aproximação. Em não-térmico, arcos de baixa intensidade, as colisões elétron-átomo neutro podem ser pouco frequentes, o suficiente para que as populações eletrônicas e do gás neutro estejam dissociadas, podendo não haver diferenças muito significativas em suas temperaturas. A corrente de arco não é uma característica definitiva das duas divisões. Arcos térmicos são possíveis com correntes inferiores a 50 A, tal como são os arcos não-térmicos com correntes superiores a 50 A. Observa-se que características como: corrente de arco, razão  $E/P$ , potência dissipada por unidade de comprimento de arco e pressão na qual está sendo operado não são definitivas para as divisões de arco. Assim, estes parâmetros podem se sobrepor e mesclar para arcos não-térmicos e térmicos (ROTH, 1995). Além disso, arcos não-térmicos, arcos de baixa intensidade, geralmente requerem emissão termiônica a partir dos cátodos, enquanto que arcos térmicos, arcos de alta intensidade, normalmente operam na emissão de campo. Arcos térmicos são sempre encontrados em altas pressões e temperaturas elevadas de gases, ao passo que os arcos não-térmicos podem ocorrer a pressões baixas, ou seja, abaixo de 500 Pa, aproximadamente. Arcos não-térmicos, também podem existir a pressões atmosféricas e mais elevadas, mas com baixa temperatura cinética dos elétrons.

## 2.6 PLASMAS TÉRMICOS, NÃO-TÉRMICOS E INTERMEDIÁRIOS

Sistemas de plasmas de baixa temperatura são tradicionalmente divididos em duas grandes categorias: térmicos e não-térmicos, os quais são caracterizados por suas vantagens e desvantagens específicas. Nos sistemas que utilizam plasma térmico incluem descargas com arco, plasmas por rádio frequência com acoplamento

indutivo, entre outros e, em suas características, são associados com aquecimento Joule e ionização térmica. Estes sistemas podem operar com altas potências, de até 50 MW, e a altas pressões, atingindo temperaturas de 2000 a 50000 K com alta entrada de energia em todos os graus de liberdade, sem seletividade nas reações químicas. A ausência da seletividade química e a alta temperatura resultam em um controle muito pequeno sobre os processos químicos dentro de um plasma. Para o controle das reações são usados processos de resfriamento rápido (CUNHA, 2014).

Sistemas com plasmas não-térmicos, no qual se incluem plasma *glow* de baixa pressão, radio frequência (RF), descarga corona, entre outros, oferecem alta seletividade e eficiência energética para as reações químicas no plasma. Estes sistemas são capazes de operar eficientemente em baixas temperaturas, sem qualquer sistema de resfriamento. Contudo, em um plasma não-térmico, os níveis de pressão e potência são relativamente baixos, restringindo a sua aplicabilidade para processos industriais em larga escala (FRIDMAN, A; KENNEDY, 2004).

Limitações das descargas convencionais térmicas e não-térmicas contêm a indisponibilidade de fornecer simultaneamente um alto nível de seletividade nas reações químicas, alta potência, uma alta temperatura dos elétrons e uma alta densidade de elétrons. Também, do ponto de vista das aplicações químicas, a descarga térmica é sempre muito quente, enquanto que, nas descargas convencionais não-térmicas, a temperatura dos átomos está próxima a ambiente, a qual é muito baixa para muitas aplicações. Contudo, o plasma mais solicitado para aplicações químicas deve ter alta potência, para uma eficiente produtividade do reator, e alto nível de desequilíbrio entre diferentes graus de liberdade, a fim de manter os processos de seletividade química à pressão atmosférica ou altas pressões com temperaturas controláveis. Conclui-se, portanto, que o desafio vital da física de descargas elétricas e engenharia é combinar as vantagens dos dois sistemas, plasma térmico e não-térmico, a fim de desenvolver descargas elétricas em altas pressões, com alta potência e com controle de temperatura.

Uma das possíveis maneiras de criar um poderoso plasma fora do equilíbrio é usar a descarga transitória do arco, chamado de plasma intermediário. Esta descarga periódica, durante um ciclo, evolui de arco térmico para não-térmico com um nível

relativamente elevado de densidade eletrônica. Esse plasma ficou conhecido inicialmente como arco deslizante ou *gliding arc* (GA).

A seguir, serão abordados os conceitos acerca das tochas de plasmas dos tipos térmico, não-térmicos e intermediários, fundamentais para a compreensão do plasma deslizante utilizado neste trabalho.

### 2.6.1 Plasma Térmico

Um das formas de se gerar o plasma térmico é através de instrumentos chamados tocha de plasma ou *plasmatron*. Tochas de plasmas são instrumentos construídos para a conversão de energia elétrica em energia térmica. Neste processo, se utiliza o arco elétrico gerado como agente conversor. Pode-se caracterizá-los, basicamente, de duas formas: arco elétrico livre e arco elétrico confinado. No primeiro, ocorre uma convecção natural na troca de calor entre o arco e o gás ambiente. No segundo caso, se diz que a troca de calor é por convecção forçada. Neste, o arco produzido na tocha é confinado por: a) estabilização por parede fria; b) estabilização por parede segmentada; c) estabilização por parede porosa; d) estabilização por turbulência; e) estabilização por vórtice; e f) estabilização magnética, o qual apresenta muito mais eficiência que o processo natural.

O mecanismo utilizado para controle e operação das tochas, em geral, é o mesmo. Basicamente, se baseia no arco elétrico confinado dentro de um canal que, ao passar o gás, as moléculas ganham energia por colisão com o feixe de elétrons, de forma que são dissociadas, ionizadas em sua maioria, se a energia for suficiente, gerando assim o plasma. Fundamentalmente, podem-se classificar três formas para ionizar um gás: a ionização por campo, a ionização térmica e a ionização por bombardeamento de radiação de alta energia.

As características gerais das tochas de plasmas são (ZUCOLOTTO, 2006 p. 21):

- ❖ Alta temperatura do arco: 20000 K;
- ❖ Alta eficiência de conversão de energia elétrica em térmica: pode chegar até 95%;
- ❖ Utilização de quaisquer gases: oxidantes, neutros ou redutores;

- ❖ Alta entalpia do fluxo de plasma;
- ❖ Alta densidade de potência;
- ❖ Alta condutividade térmica do fluxo de plasma.

Vários modelos de tocha de plasmas são construídos e podem ser construídos a partir desses elementos. Chamados de *plasmatróns*, os modelos de tochas variam, pois muitos são suas aplicações tecnológicas. Podem-se classificar as tochas de acordo com o arco, cátodo e sistema de estabilização. A Figura 7 mostra três tipos de tochas e suas curvas características tensão-corrente ( $V \times I$ ). A Figura 8 mostra uma tocha de plasma térmico em funcionamento.

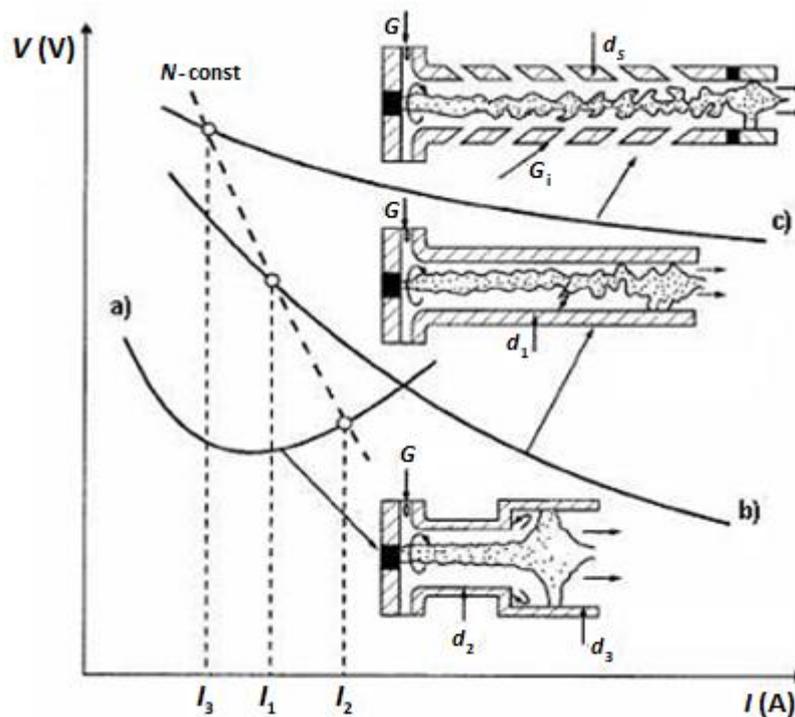


Figura 7 – Classificação das tochas de plasmas quanto às características da curva tensão-corrente ( $V \times I$ ); a) ascendente; b) descendente e c) descendente  $d_s$  = anodo segmentado,  $d_1$  = anodo reto,  $d_2$  = primeiro diâmetro do anodo em degrau,  $d_3$  = segundo diâmetro do anodo em degrau, e  $G$  = vazão do gás injetado na câmara de vórtice,  $G_1$  = vazão do gás injetado no anodo segmentado) (SOLONENKO, 2003; ZHUKOV et al., 2007).



Figura 8 – Tocha de plasma térmico com cátodo de zircônio, ânodo reto, arco não-transferido operando com CO<sub>2</sub>, desenvolvida no LPT, UFES.

## 2.6.2 Plasma Não-Térmico

Os plasmas não-térmicos são bem explorados dentro das pesquisas de plasmas em laboratório. Considerados bons promissores para a síntese química e orgânica, suas características permitem até mesmo aplicações em tratamento de gases combustível. Isso se faz possível, em virtude de suas propriedades de não-equilíbrio, baixa necessidade de potência (fonte de plasma) e capacidade de induzir reações físicas e químicas dentro de gases a temperaturas relativamente baixas (PETITPAS et al., 2007).

Características em relação a temperatura dos elétrons nos plasmas revelam que os plasmas não-térmicos podem atingir temperaturas entre  $10^4$ - $10^5$  K (1-10 eV), variando em até uma ordem de grandeza; ao mesmo tempo que a temperatura do gás ionizado pode permanecer tão baixa quanto à temperatura ambiente. É a partir dessa diferença de temperatura elevada dos elétrons que se determina a química

incomum de plasmas não-térmicos. Com base nos mecanismos de geração de plasma, da pressão aplicada e da geometria dos eletrodos, os tipos de plasmas não-térmicos variam muito, incluindo a descarga corona, descarga silenciosa ou DBD, a descarga glow, descarga de micro-ondas (MW) e descarga de rádio frequência (RF) (PETITPAS et al., 2007).

Na Figura 9 é mostrado um plasma não-térmico, conhecido como DBD. Neste caso, é uma descarga com barreira dielétrica dupla, em ambiente de baixa pressão e alimentada por uma fonte de rádio frequência (RF). Os plasmas DBD podem também ser alimentados por fontes de 60 Hz.

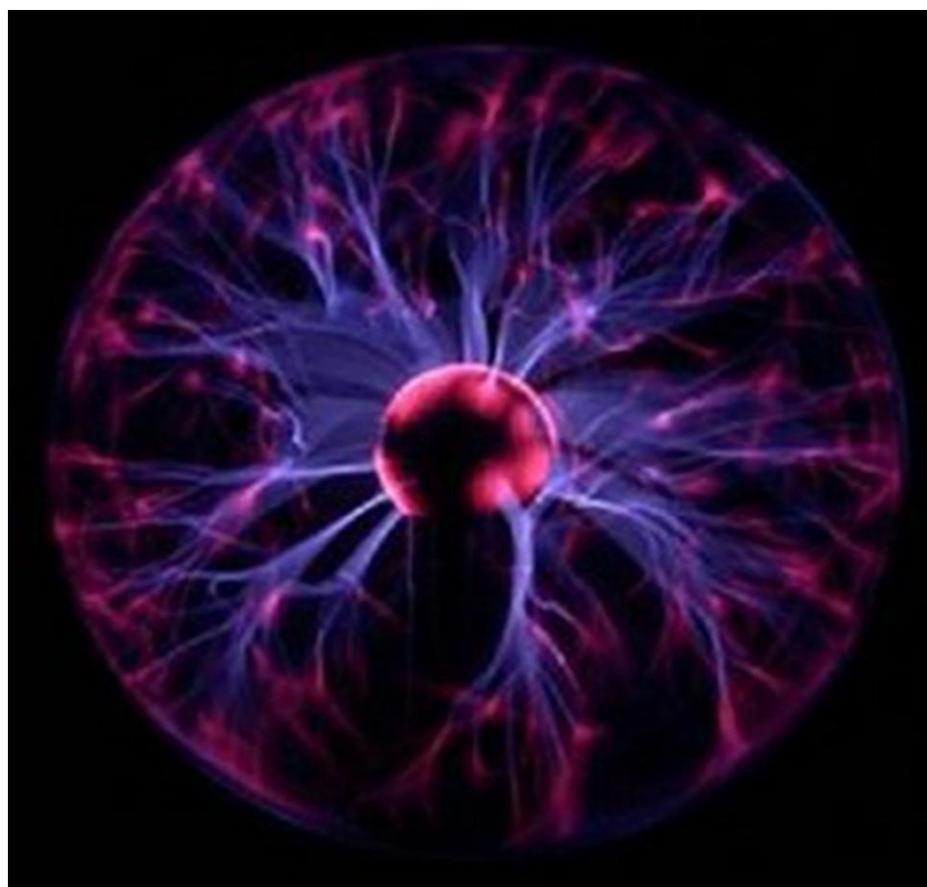


Figura 9 – Imagem de plasma não-térmico tipo DBD em baixa pressão, encontrada em globos de plasma.

### **2.6.3 Plasma Intermediário**

O plasma intermediário representa o tipo de plasma que se procura, com parâmetros de plasma entre as descargas térmicas e não-térmicas. Estas descargas devem ser

consideradas como **descargas de transição não-térmicas**, pois a temperatura do gás aumenta significativamente, por curto período de tempo, contudo, por não possuir energia suficiente, as descargas não avançam para o regime térmico. Nas descargas de transição, quando comparadas com as descargas no regime térmico, a temperatura do gás ionizado é menor, contendo temperaturas da ordem de 2000 – 4000 K, quanto que, a temperatura do plasma térmico se encontra na ordem de 10000 K. A ionização dos gases em descargas de transição é definida por impactos diretos de elétrons ou por etapas de ionização de elétrons. O impacto direto de elétrons é caracterizado pela interação direta de um feixe de elétrons incidente de alta energia, acelerados pelo alto campo elétrico existente, e um átomo ou molécula neutra do gás plasmático.

Uma das consequências, em geral, é o arrefecimento intensivo de qualquer descarga elétrica, devido a interação com o gás. Contudo, o arrefecimento pode ser compensado pelo aumento da intensidade do campo elétrico. Para que isso ocorra, o envolvimento de mecanismos de não-equilíbrio deve aumentar. Desse modo, a fim de obter mais condições de não-equilíbrio para a descarga de arco, se faz necessário aumentar o arrefecimento da descarga, sem acréscimos na intensidade de corrente. Esta é a razão pela qual o arco deslizante (*gliding arc*) com arrefecimento por convecção sofre grandes variações de regime de arco, quando comparados com um arco sem refrigeração forçada e com a mesma corrente. Dessa forma, o *gliding arc* de baixa corrente se apresenta, como um bom exemplo de descarga de transição, proporcionando benefícios das descargas térmicas e não-térmicas em conjunto. Características advindas dos sistemas de plasma térmico: alta densidade do plasma, alta potência e pressão de operação elevada; e, advindas dos sistemas de plasma não-térmicos: alto nível de não-equilíbrio, alta temperatura de elétrons, temperatura intermediária do gás, resultando na possibilidade de estimular os processos químicos seletivos, sem a necessidade de *quenching* (resfriamento). Estas propriedades de descargas de transição do arco deslizante se tornam atraentes para muitas aplicações industriais (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). Sendo assim, os tipos de descargas ou plasmas que apresentam transição entre térmico e não-térmico podem ser chamados de sistemas de “**plasmas intermediários**”.

Plasmas intermediários podem ser obtidos, por exemplo, em sistemas sem autossustentação. O método usado mais comumente é do feixe de elétrons para a ionização. Primeiramente, o feixe de elétrons é direcionado através de uma região entre dois eletrodos. Este bombardeamento de elétrons não relativísticos causa a ionização, resultando num canal de plasma condutivo. O esquema de um sistema com descarga sustentado por um feixe de elétrons é mostrado na Figura 10.

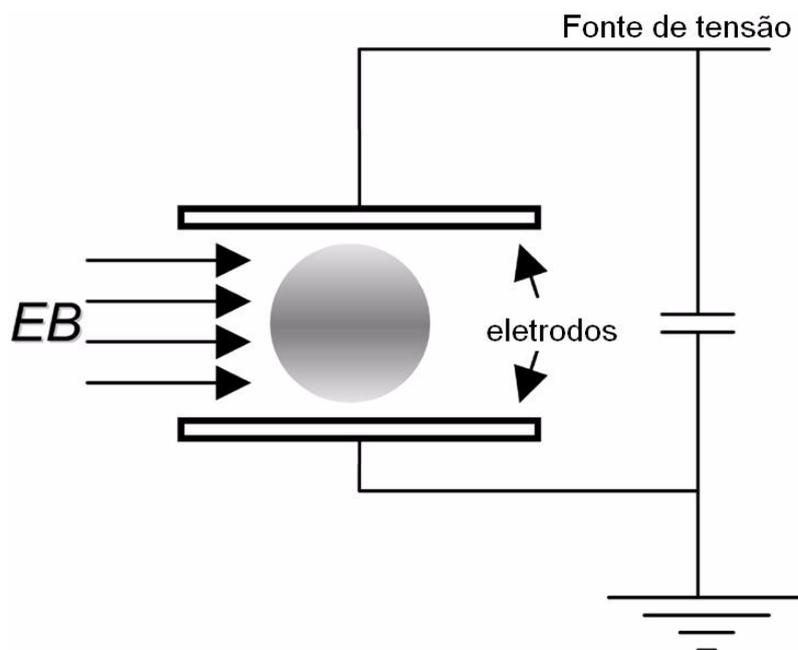


Figura 10 – Esquema generalizado de um plasma intermediário mantido por um feixe de elétrons (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).

O feixe de elétrons é injetado sobre o gás, usualmente paralelo aos eletrodos, e uma diferença de potencial é aplicada aos eletrodos através de capacitores. Dessa forma, o plasma é gerado devido à ionização pelo feixe de elétrons e à corrente elétrica fornecida por um campo elétrico externo.

Outra possível fonte de plasma intermediário é a descarga por micro-ondas (MW), como foi dito anteriormente. MWs com pressões moderadas ( $\sim 10^4$  Pa) produzem plasma fortes fora do equilíbrio, em certas condições. O esquema de um sistema com plasma sustentado por micro-ondas é mostrado Figura 11. O plasma é feito dentro de um tubo isolante (usualmente feito de quartzo), transparente a micro-ondas, absorvendo a radiação das micro-ondas conduzidas por um guia de onda. Esses tipos de descargas com micro-ondas possuem duas regiões distintas: região central, relativamente quente ( $\sim 6000$  K), sem movimento significativo do gás e com

baixa intensidade do campo elétrico, e, uma região periférica relativamente fria ( $\sim 2000$  K), com alto campo elétrico.

A região central do plasma tem uma fina camada superficial (*skin layer*) condutora, que não deixa a micro-ondas entrar até o centro da coluna. Deste modo, a maior parte da energia é dissipada na região periférica, com temperatura intermediária. Neste caso, a região quente central pode ser considerada como uma fonte de elétrons para a região periférica, que não se mantém através de descarga. Este tipo de descarga foi extensivamente testado no passado para ativar processos químicos via plasma e tem demonstrado ser mais promissor em vários processos, tais como dissociação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  (RUSANOV; FRIDMAN, 1984).

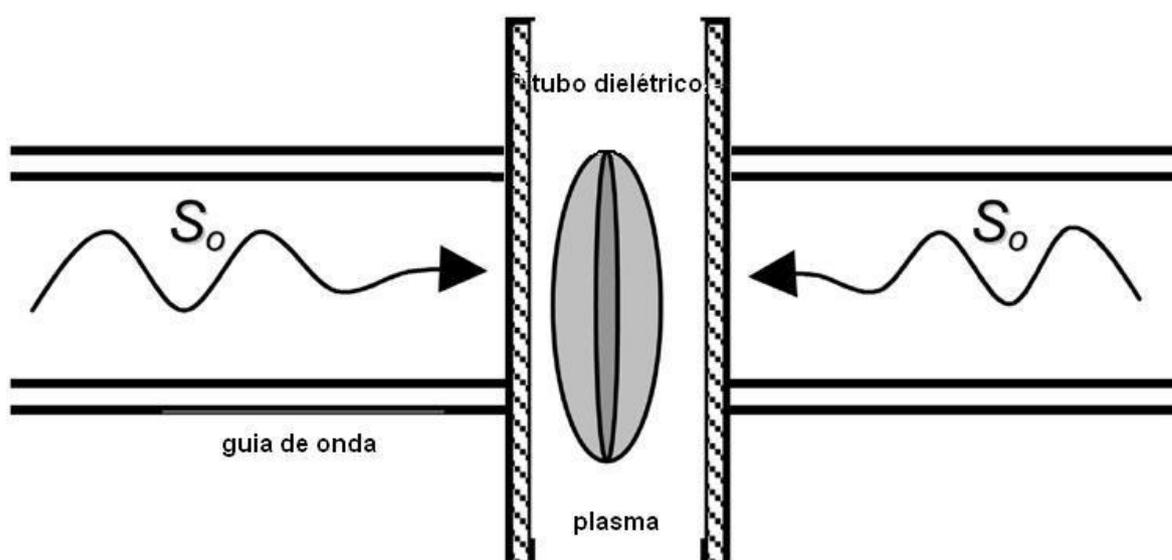


Figura 11 – Esquema generalizado de uma descarga por micro-ondas em um guia de onda. Há núcleo mais quente e o plasma intermediário em torno dele dentro do tubo (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).

Devido à complexidade e alto custo, as fontes para feixe de elétrons e micro-ondas têm aplicações limitadas.

### 2.6.3.1 Arco deslizante convencional

O arco deslizante ou *gliding arc* é um plasma não estacionário mantido por uma descarga elétrica, que se desenvolve entre dois eletrodos divergentes paralelos, e é soprado por um fluxo de gás (Figura 12). Pode ser alimentada com tensão contínua ou alternada.

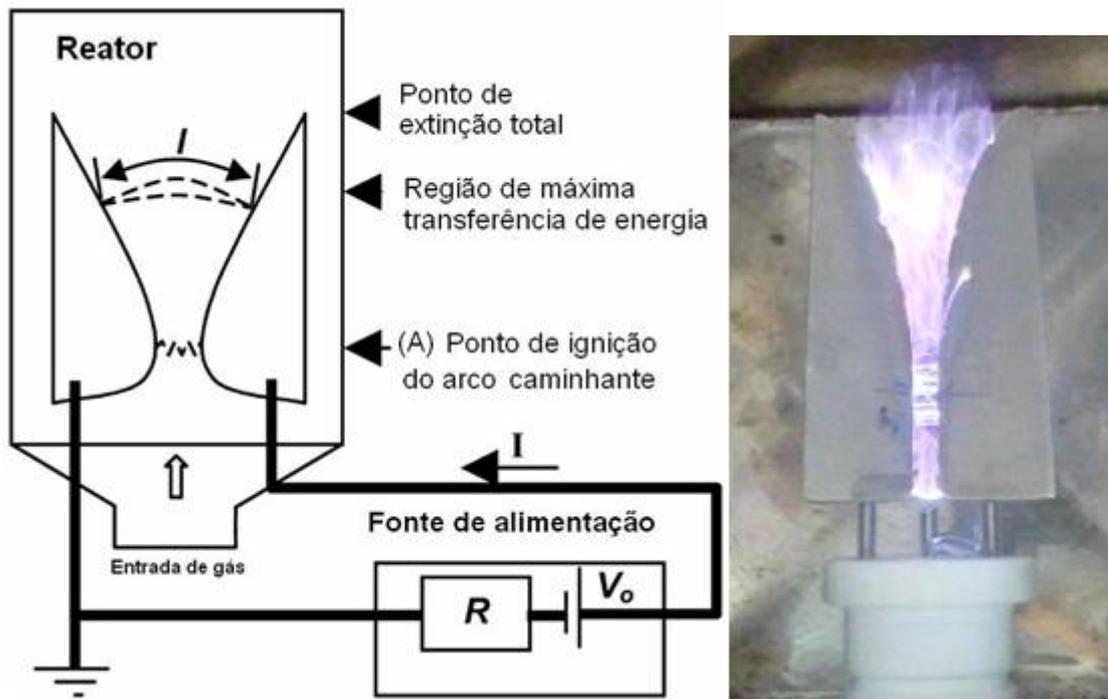


Figura 12 – A esquerda, esquema de arco deslizante e circuito elétrico (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). A direita, foto de um arco deslizante produzido no LPT, UFES.

O arco começa na região de menor distância entre os eletrodos (ponto A), quando a intensidade do campo elétrico, nesta região, atinge valores em torno de 3 kV/mm para o ar. Em um tempo muito pequeno (alguns micro segundos) a corrente do arco aumenta até atingir seu valor

$$I_{max} \leq V_0 / R, \quad (1)$$

enquanto que a diferença de potencial do arco

$$V = V_0 - I \cdot R \quad (2)$$

cai a quase zero. Se o fluxo de gás é forte o suficiente, ele força o arco a se mover ao longo dos eletrodos divergentes e se alonga. Este alongamento conduz a um aumento da resistência do arco, resultando na elevação da diferença de potencial e na queda da corrente elétrica. O aumento do comprimento do arco demanda mais potência para sua manutenção.

Para o esquema elétrico da Figura 12, pela expressão para o cálculo da resistência, quando a resistência do arco se iguala à resistência externa  $R$  ocorre a máxima transferência de energia para o plasma, sendo

$$W_{max} = (1/4) V_0^2 / R. \quad (3)$$

O comprimento do arco continua a aumentar, mas a potência fornecida pela fonte é insuficiente para contrabalancear a perda de calor para o gás em torno do arco. O arco esfria e, finalmente, se extingue. Assim que a diferença de potencial entre os pontos mais próximos do eletrodo atinge o limite de rigidez dielétrica do gás, um novo ciclo se inicia. Durante esse processo o arco elétrico é alongado, então, passa a ter as características desejadas, funcionando num estágio inicial muito próximo ao regime do plasma térmico e, depois de atingir determinado comprimento, passando a funcionar como um plasma não-térmico.

A literatura reporta que a temperatura de um arco deslizante está em torno de 3000 K (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). Na realidade, o pequeno arco inicial na região mais próxima dos eletrodos atua como uma fonte de elétrons e espécies excitadas e o resfriamento convectivo, devido ao fluxo de gás e o alongamento do arco, levam a um regime de plasma intermediário ou a formação de uma descarga intermediária de longa duração, antes de sua extinção.

A Figura 13 mostra uma fotografia com várias exposições que mostrando o arco iniciando no regime térmico, na parte inferior dos eletrodos e se alongando até sua extinção.



Figura 13 – Deslocamento do arco deslizante do regime térmico para não térmico; usando uma sequência de exposições de fotos (FRIDMAN, A', 2008).

Devido à variação periódica do comprimento do arco, os valores de corrente e tensão tem comportamentos inversos, como pode ser visto na Figura 14.

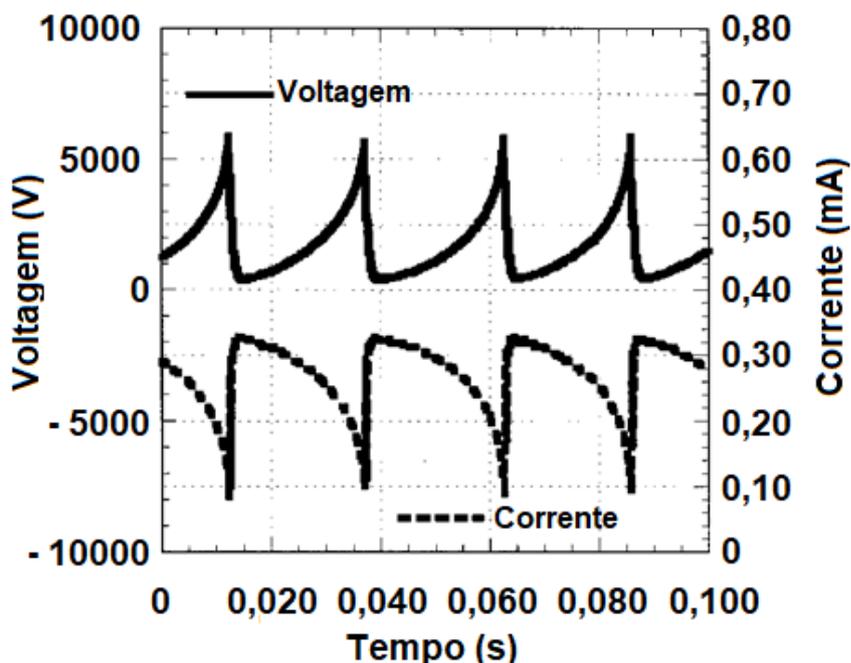


Figura 14 – Um oscilograma típico de tensão-corrente de arco deslizante (MUTAF-YARDIMCI et al., 2000).

Em 17 de novembro de 1988, foi registrado um pedido de invenção, no *Institut National de La Propriété Industrielle* da República Francesa, pelos inventores Hervé Lesueur, Albin Czernichowski e Joseph Chapelle (CZERNICHOWSKI, A., 2001; CZERNICHOWSKI, A', 1994; CZERNICHOWSKI, A et al., 1990; LESUEUR; CZERNICHOWSKI; CHAPELLE, 1988), que foi uma das primeiras configurações de uma fonte de plasma intermediário, que ficou conhecido como arco deslizante ou *gliding arc* (GA). Na Figura 15 são mostradas duas configurações propostas. À esquerda: com dois eletrodos que pode operar com corrente alternada ou contínua, e à direita: com três eletrodos para serem alimentados com corrente alternada trifásica.

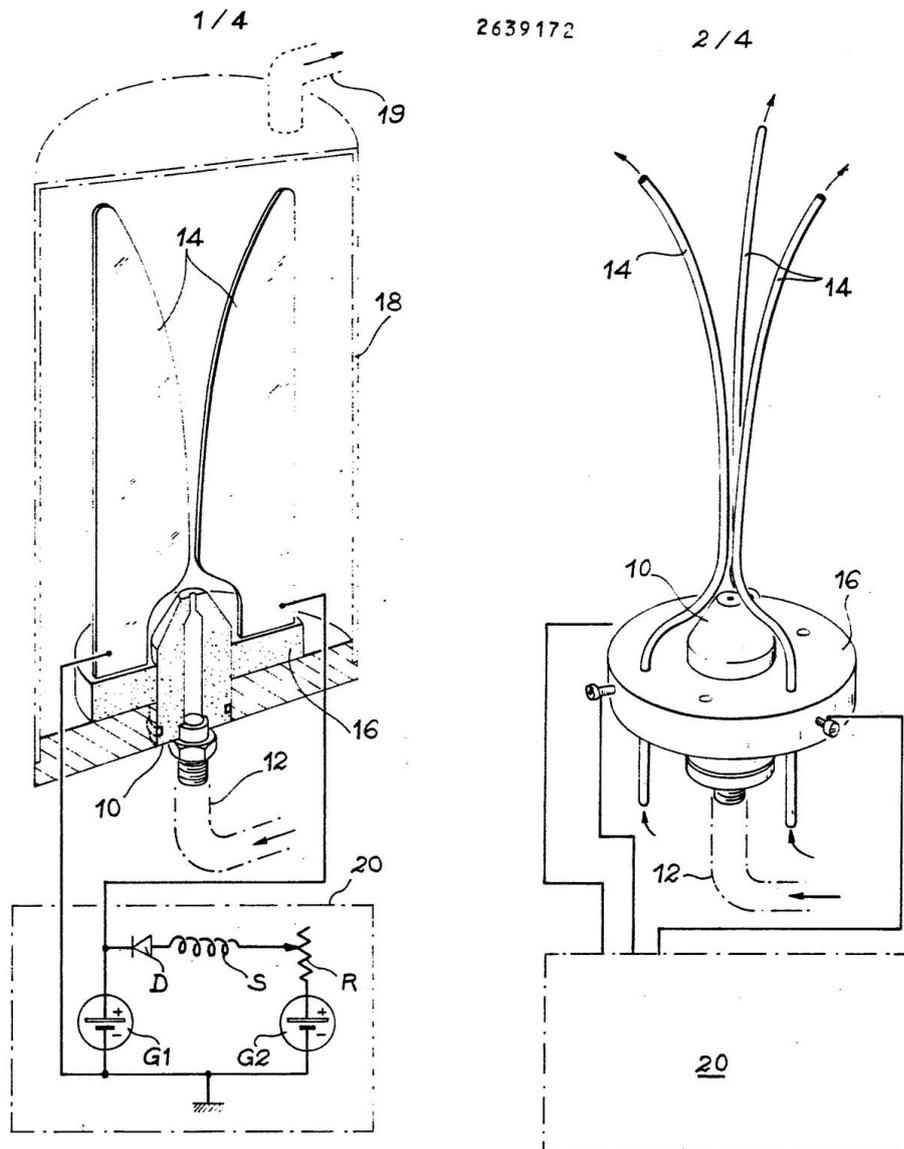


Figura 15 – Configuração originais de duas propostas de arco deslizante desenvolvidas por Hervé Lesueur, Albin Czernichowski e Joseph Chapelle, em 1988 (CZERNICHOWSKI, A., 2001; CZERNICHOWSKI, A', 1994; CZERNICHOWSKI, A et al., 1990; LESUEUR; CZERNICHOWSKI; CHAPELLE, 1988).

Este tipo de plasma foi estudado intensivamente por Fridman *et al* (BO et al., 2008; DU et al., 2012; FRIDMAN, A', 2008; FRIDMAN, A et al., 1999; INDARTO, A' et al., 2007; INDARTO, A et al., 2006; LIN et al., 2006; RUEANGJITT; SREETHAWONG; CHAVADEJ, 2008; TU; WHITEHEAD, 2014). O arco deslizante foi estudado inicialmente em uma configuração plana convencional (MUTAF-YARDIMCI et al., 2000), por ser uma forma fácil de produzir plasmas intermediários.

Foram testados reatores com dois arcos deslizantes em série, que permitiu um melhor tratamento dos gases. Uma montagem desse tipo pode ser vista na Figura 16.

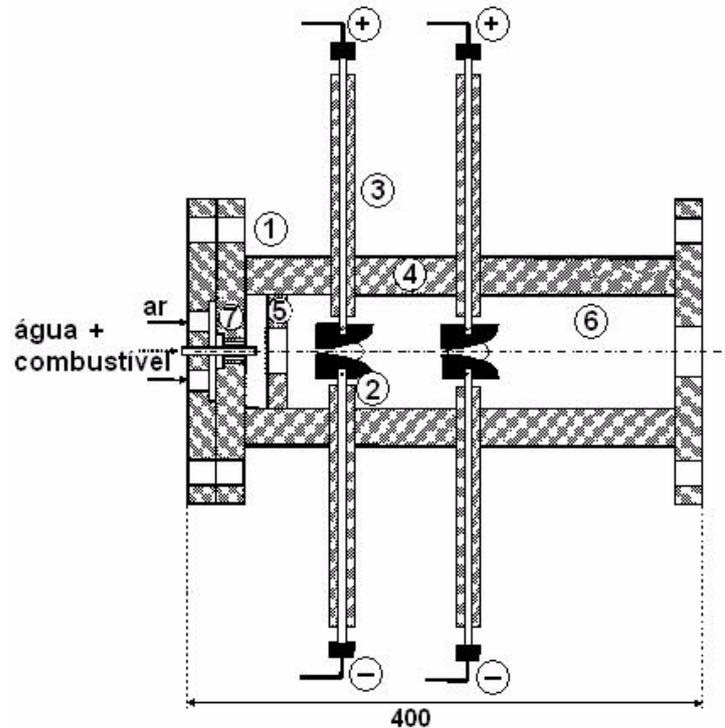


Figura 16 – Desenho do reator de plasma com duplo arco caminhante: (1) vaso em aço inox, (2) eletrodos, (3) suporte dos eletrodos, (4) isolamento térmico interno, (5) guia da chama, (6) câmara pós-descarga e (7) sistema de injeção (PETITPAS et al., 2007).

São possíveis diferentes configurações para o arco deslizante. Lin Lie apresentou um modelo trifásico de arco deslizante e afirma que possui algumas vantagens em relação ao sistema com dois eletrodos (LIN et al., 2006). Por exemplo, maior potência no plasma, melhor distribuição de temperatura na saída do gerador de plasma, simplicidade e baixo custo da fonte de potência. A Figura 17 mostra um reator com a configuração trifásica.

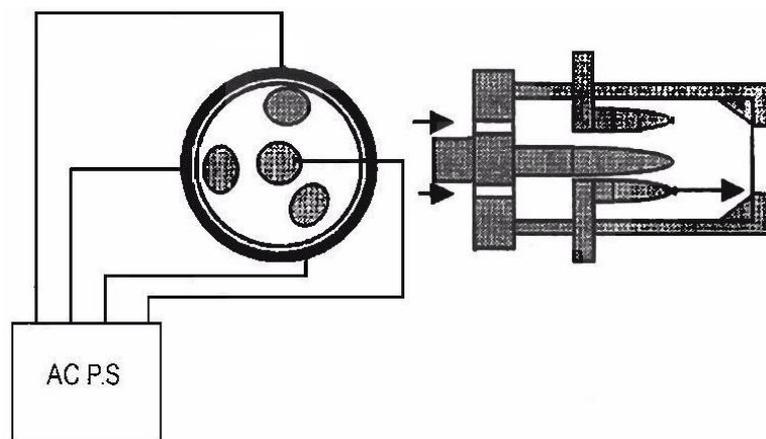


Figura 17 – Diagrama esquemático de um gerador de arco caminhante AC trifásico (LIN et al., 2006).

Os reatores de plasma com arco deslizante podem processar diretamente, com baixa queda de pressão, gases diferentes (Ar, ar, vapor de água, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, CO<sub>2</sub>, hidrocarbonetos e suas misturas), pré-aquecido e frio, na faixa de pressão de 0,5 a 5 atm. A energia elétrica é introduzida diretamente no volume da reação para criar uma situação de não-equilíbrio, gerando um ambiente muito reativo para promover as transformações químicas de interesse. Até 80% da energia elétrica pode ser absorvida diretamente por reações químicas endotérmicas. O tempo médio de permanência dos reagentes na zona de reação é de aproximadamente 10<sup>-3</sup> s. Esse fato permite altíssimas vazões específicas na zona de reação, que geralmente excede em quatro ordens de magnitude outros métodos químicos, incluindo eletroquímicos e térmicos (FRIDMAN, A et al., 1999). Algumas das possíveis aplicações estão sendo testadas em reatores de laboratório e em escala industrial, desde os anos 1990 (CZERNICHOWSKI, A', 1994), como:

- controle de emissão de compostos orgânicos voláteis, compostos (xileno, tolueno, heptano, tetracloretileno;
- metiletilcetona), amônia, livre ou ligada, fenóis, formaldeído, nitratos orgânicos, mercaptanos diluídos, e/ou H<sub>2</sub>S, metano diluído, etc.;
- controle de emissão de fuligem, poli (hidrocarbonetos aromáticos),
- SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>;
- incineração completa ou parcial de H<sub>2</sub>S concentrado ou misturas de H<sub>2</sub>S + CO<sub>2</sub> (processo de arco deslizante);
- conversão de gás natural em syngas (H<sub>2</sub> + CO);
- transformação de metano em acetileno e hidrogênio;

- destruição de N<sub>2</sub>O;
- reforma de resíduos de petróleo pesado;
- Decomposição e incineração de freons concentrados;
- dissociação de CO<sub>2</sub>;
- superaquecimento de vapor, oxigênio e outros gases ou chamas;
- ignição de propulsores;
- geração de UV;
- descontaminação do solo ou areias industriais;
- ativação de fibras orgânicas (FRIDMAN, A et al., 1999).

O arco deslizante (GA) ocorre quando um plasma é gerado por uma descarga elétrica entre dois ou mais eletrodos divergentes, sujeitos a um sopro de jato de gás. Como o GA oscila entre dois regimes de plasma, térmico e não-térmico, possui certas desvantagens, que incluem: mudança contínua do regime operacional do arco; geometria plana bidimensional do eletrodo (2D) incompatíveis com a maioria dos sistemas industriais; tratamento de gases extremamente não uniforme, pois a maior parte do gás de entrada flui ao redor do arco; baixo tempo de residência do gás no reator devido a uma elevada demanda de velocidade de gás. Todos estes inconvenientes reduzem a eficiência e o grau de conversão em processos de plasma (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005). Portanto, é muito difícil alcançar a estabilidade do arco com o GA. Aqui, a estabilidade do arco pode ser considerada a condição em que há regularidade da posição do arco nas superfícies dos eletrodos e uniformidade do plasma.

Em uma tentativa de manter o arco indefinidamente em uma condição operacional de plasma não-térmico, novas configurações foram desenvolvidas para o GA (FRIDMAN, A; CHIROKOV; GUTSOL, 2005; GUOFENG; XINWEI, 2012; KALRA et al., 2005; LIU et al., 2016; NUNNALLY et al., 2009; PIAVIS; TURN, 2012).

### 2.6.3.2 Disco de plasma (MGA)

O disco de plasma ou “*magnetic gliding arc*” (MGA) é uma configuração especial de arco deslizante. Esta configuração é mostrada na Figura 18. Um cilindro metálico (1) atua como cátodo e está a um potencial negativo em relação ao ânodo (2), no qual

este deve ser aterrado. Um fluxo de gás é injetado entre este cilindro e o cilindro externo (2), que funciona como ânodo. Na região da descarga se aplica um campo magnético  $B$ , gerado por ímãs permanentes afixados na parte exterior do ânodo (4). A direção do campo magnético determina a direção de rotação do arco, e a intensidade do campo magnético, juntamente com o diâmetro do cátodo, determinam a frequência de rotação do arco. Para a ignição inicial é usada a espiral (3), presa ao cátodo e extremidade oposta livre, a uma distância de 3 mm do ânodo, por onde rompe o arco, quando a ddp fornecida pela fonte for em torno de 10 kV.

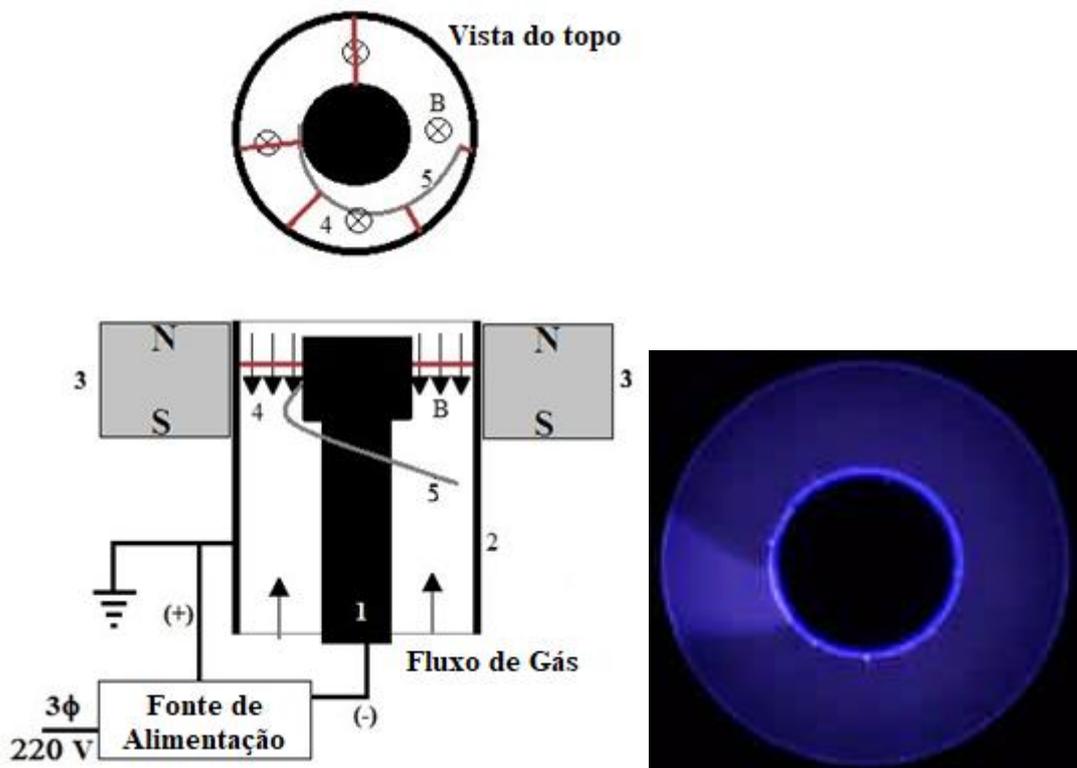


Figura 18 – Diagrama esquemático de um MGA geral usado. 1: cátodo; 2: ânodo; 3: ímãs permanentes; 4: direção e sentido do campo magnético; 5: fio condutor rígido para ignição do arco. A esquerda imagem do plasma (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005).

**Operação:** Quando é aplicada uma diferença de potencial (ddp) típica (10 kV) entre cátodo e ânodo, tem-se uma descarga inicial na extremidade livre da espiral. Com a interação do campo magnético, o arco gira e aumenta seu comprimento, devido ao aumento da distância entre o cátodo e ânodo. O aumento do comprimento do arco resulta em um resfriamento rápido do arco e na obtenção de temperaturas intermediárias (2000 a 3000K). Uma vez que o arco atinge o cátodo cilíndrico, o sistema se estabiliza mantendo a rotação e temperatura estável, Figura 18 à direita.

Se a frequência de rotação do arco (que depende da intensidade do campo magnético) é rápida o suficiente, comparado com a velocidade do gás, tem-se um tratamento uniforme do fluxo de gás. É importante enfatizar que, quando a razão entre a intensidade do campo magnético e a vazão do fluxo de gás é bastante alta, depois que o arco chegou ao cátodo cilíndrico, significa atingir comprimento radial constante, e começar a rodar em uma posição axial fixa. Assim, é possível diminuir a corrente do arco. Isto significa que o arco se propaga através de um gás já ionizado e não mais através de um gás não ionizado. Desse modo, a descarga elétrica não se extingue completamente entre dois aparecimentos da descarga na mesma posição e, devido ao efeito da persistência da luz na retina, se tem a impressão de estar vendo um disco de plasma.

Wang *et al* (WANG et al., 2018) desenvolveram outro MGA com uma pequena diferença no sistema de ignição, o qual pode ser visto na Figura 19.

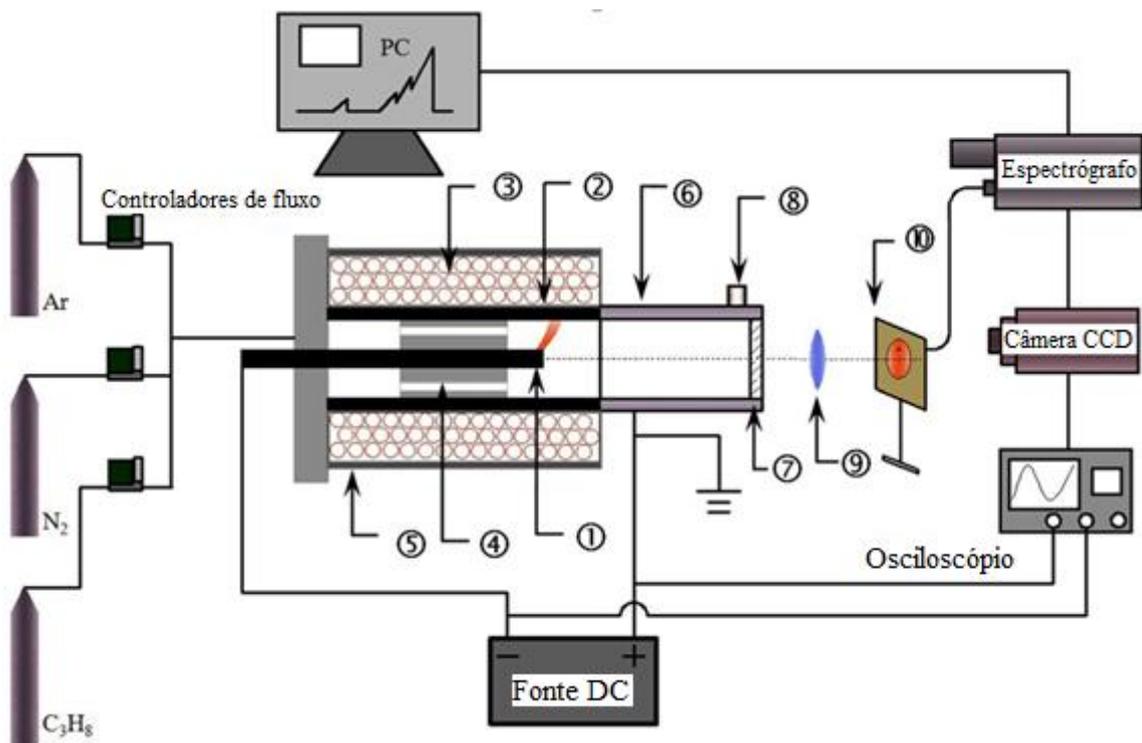


Figura 19 —Esquema da configuração experimental. 1-cátodo, 2-ânodos, 3-bobina magnética, 4-difusores, 5-flanges, 6-câmara de deposições, 7-janela de vidro, 8-saídas, 9-lentes, 10-telas com estágio de translação (WANG et al., 2018).

### 2.6.3.2 Descarga de arco deslizante rotacional (RGA)

Em 2002, Eugen *et al* (HNATIUC *et al.*, 2014; LEE *et al.*, 2007) propuseram uma configuração, Figura 20, em que o eletrodo externo era um tubo cilíndrico e o eletrodo interno, que é o cátodo, um tronco de cone. Esta configuração de cátodo cônico foi seguida por outros pesquisadores (WU *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2018; ZHU *et al.*, 2016). Devido à geometria do tronco de cone, não é possível afirmar qual é a distância entre os dois eletrodos em que o arco se estabelece, visto também que, é influenciada pela vazão do gás. Este dispositivo ficou conhecido como descarga de arco deslizante rotacional (RGA) (em inglês, *rotating gliding arc discharge reactor*).

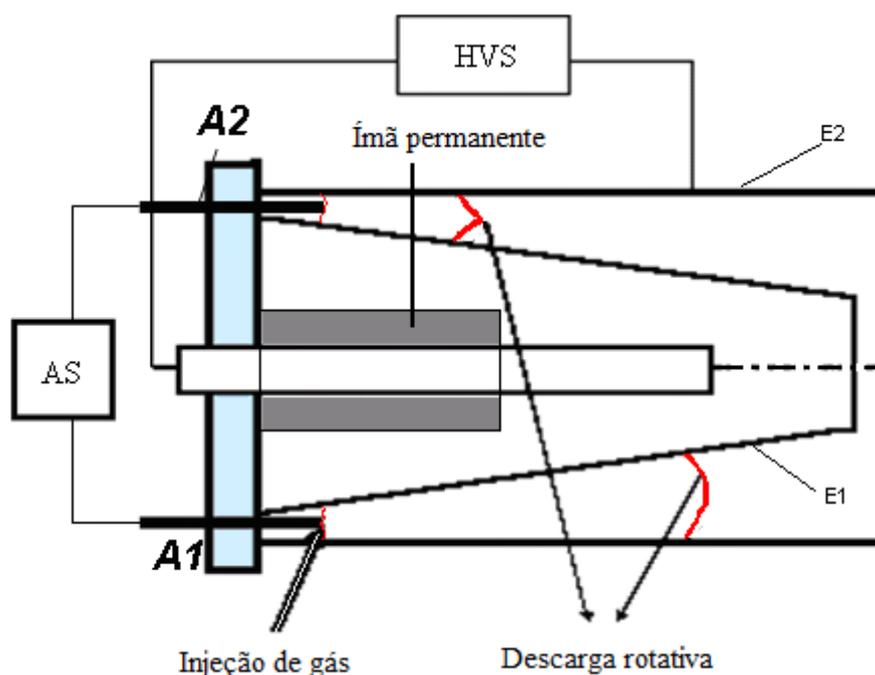


Figura 20– Diagrama esquemático de um reator do tipo descarga de arco deslizante rotacional, desenvolvida por Eugen *et al* em 2002 (HNATIUC *et al.*, 2014).

No presente trabalho, estamos focados especificamente nos GA com campo magnético, onde a região do cátodo, na qual o arco se estabelece, é cilíndrica (ao invés de cônica). Assim, garante-se que a distância entre o cátodo e o ânodo, na região do arco, é constante. Inicialmente, estes sistemas foram chamados de *plasma disk* (KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005; OMBRELLO *et al.*, 2005) e, poucos anos depois, foi chamado de uma forma mais geral como arco deslizante magnética (em inglês, *magnetic gliding arc*) (MGA). Outras denominações podem ser: sistema de descarga de plasma de arco deslizante sem equilíbrio

magneticamente estabilizado (MGA) (em inglês, *magnetically stabilized nonequilibrium gliding arc plasma discharge system*) (FRIDMAN, A et al., 1999) e descarga de arco deslizante magneticamente estabilizada (MSGAD) (em inglês, *magnetically stabilized gliding arc discharge*) (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a, b; WANG et al., 2018).

Nos estudos com o MGA foram usados valores de campo magnético de 0,07 a 0,35 mT, diâmetro máximo do ânodo de 50 mm, comprimento do arco de 10 a 20 mm, valores de corrente de 20 a 330 mA e frequência de arco entre 20 e 110 Hz. Esses autores (FRIDMAN, A et al., 1999; GANGOLI, 2007; GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a, b; KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005; OMBRELLO et al., 2005; WANG et al., 2018) usaram expressões para descrever o comportamento da frequência de rotação do arco ( $f$ ), balanceando as condições de equilíbrio entre a força de Lorentz e a força de arrasto, o que implica uma frequência proporcional a  $(IB)^{0,50}$ , onde  $I$  é a corrente e  $B$  o campo magnético. Entretanto, houveram diferenças consideráveis entre os resultados experimentais e a expressão teórica. Gangoli *et al* (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a) obteve  $f \propto I^{0,70}$  (mantendo  $B$  constante) e Wang *et al* (WANG et al., 2018)  $f \propto B^{0,63}$  (mantendo  $I$  constante).

## 2.7 OBJETIVO

Nos trabalhos anteriores de MGA (FRIDMAN, A et al., 1999; GANGOLI, 2007; GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a, b; KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005; OMBRELLO et al., 2005; WANG et al., 2018) foram encontradas dificuldades de se obter configurações estáveis de discos de plasma com correntes acima de 350 mA, comprimento de arco maior que 20 mm e diâmetro do ânodo acima de 50 mm, além de não terem conseguido modelar o giro do arco a partir de conceitos fundamentais.

O presente trabalho trata do desenvolvimento e aperfeiçoamento de um MGA onde foi feita uma mudança significativa na geometria do cátodo, que permitiu aumentar consideravelmente a estabilidade do arco, atingindo-se comprimento de arco de 40 mm, diâmetro do disco de plasma de 102,0 mm, e corrente de 300 a 400 mA.

Montagem e uso de um dispositivo eletro-óptico de baixo custo para determinar a frequência de giro do arco.

Desenvolver uma equação teórica que interliga  $f$ ,  $I$ ,  $B$  e o diâmetro  $D$  do cátodo, e outros parâmetros que podem ser aproximados num fator aproximadamente constante usando a frequência medida pelo aparato anterior.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 EVOLUÇÃO DO PROJETO (*DESIGN*) PARA ALCANÇAR UM MGA COM UM CÁTODO CILÍNDRICO ENTALHADO (MGA-CCE).

Na primeira tentativa de fazer um MGA, construímos um cátodo reto com um ânodo cônico com diâmetro máximo de 44 mm, sendo que a fonte de alimentação era ajustável através de um *variac* e possuía um retificador de onda completa na saída do transformador monofásico, com saída máxima de 13 kV. O esquema deste protótipo pode ser visto na Figura 21.

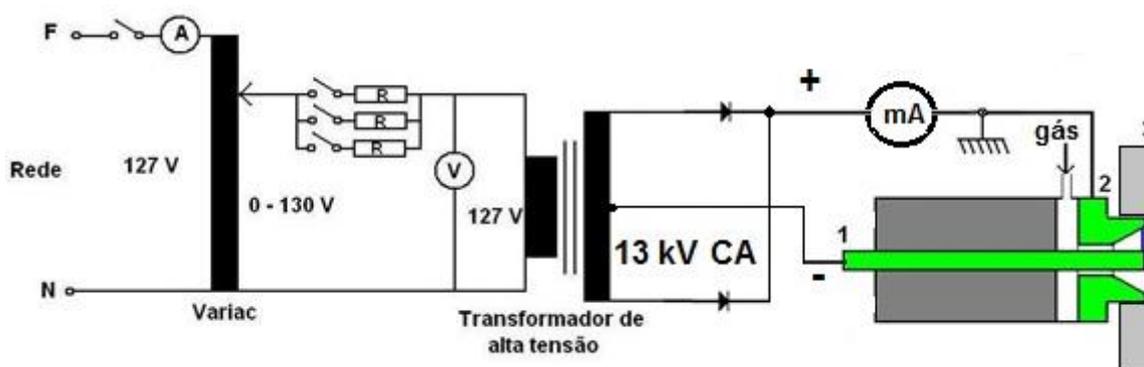


Figura 21 – Plasma em disco desenvolvido no projeto anterior; 1- cátodo, 2- ânodo e 3- ímãs permanentes de ferrite.

Neste tipo de retificador, devido à tensão reversa dos díodos, a tensão vai a zero duas vezes a cada ciclo da rede elétrica. Isto faz com que o arco elétrico se interrompa, crie falhas no disco e diminua a estabilidade do disco de plasma, que pode ser visto na Figura 22. O ânodo foi feito de cobre e o cátodo de grafite, onde este acabou superaquecendo devido aos sucessivos inícios do arco, com alta corrente.

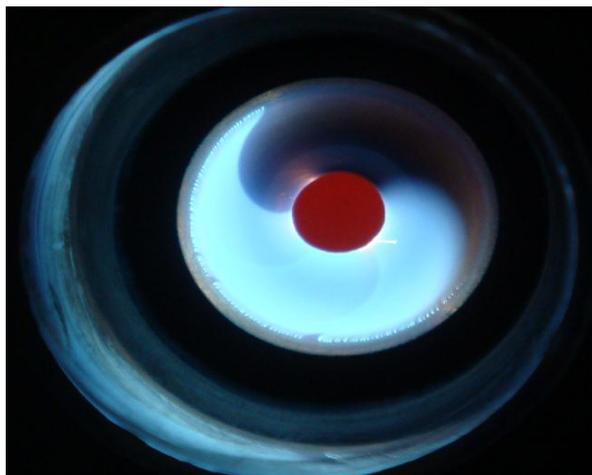


Figura 22 – Primeira tentativa de montar um MGA usando uma fonte de potência monofásica.

O problema foi resolvido com a construção de uma fonte trifásica, que será descrita em mais detalhe na próxima seção. O arco ficou estável e o cátodo não chegou a ficar incandescente, pois a corrente média era menor neste caso, como pode ser visto na Figura 23.

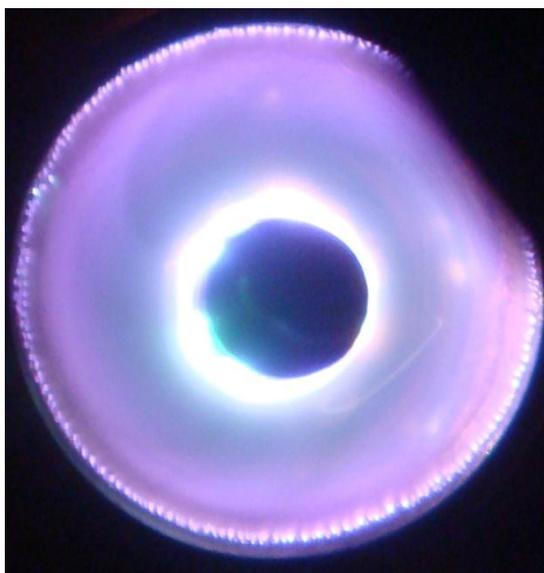


Figura 23 – Plasma em disco MGA com diâmetro de 40 mm usando uma fonte trifásica.

Com a conquista de uma significativa estabilidade de um plasma em disco com 40 mm de diâmetro, decidiu-se, então, aumentar o comprimento do arco para o diâmetro de 77 mm, pois poderia se tratar um volume maior de gás. Nesta nova configuração, foi utilizado, assim, um ânodo reto de cobre e o cátodo de grafite do plasma em disco anterior. Não foram obtidos bons resultados, dado que o cátodo apresentou alta erosão e superaquecimento, juntamente com instabilidade do arco.

Para tentar melhorar a estabilidade do arco, foi testado inicialmente um cátodo de cobre com uma superfície com duplo cone, como detalhado na Figura 24a (Protótipo 1). Isso foi feito no intuito de que o efeito de ponta pudesse ajudar a estabilidade.



Figura 24 – Imagens dos cátodos testados no desenvolvimento do MGA ao MGA-CCE: a) Protótipo 1: cátodo com uma superfície com duplo cone; b) Protótipo 2: cátodo com um entalhe relativamente pequeno em forma de U; c) Protótipo 3: cátodo com um entalhe retangular relativamente profundo. Na foto o cátodo está sem a espiral para a ignição inicial.

A esquerda da Figura 25 mostra o novo MGA com diâmetro do ânodo de 77 mm com o protótipo 1, onde aparece o fio de partida do arco. No lado direito, o MGA está



Figura 25 – Protótipo 1 em um MGA onde o ânodo tem diâmetro interno de 77 mm.

na posição que foi montado no reator, e sobre a parte cilíndrica em cobre, deve ficar os ímãs que ficam dentro do reator. Neste modelo só foi usado refrigeração no cátodo. A esquerda da Figura 26 o MGA está montado na parte superior do reator, que está com a tampa lateral fechada. Já à direita, com a tampa lateral retirada.

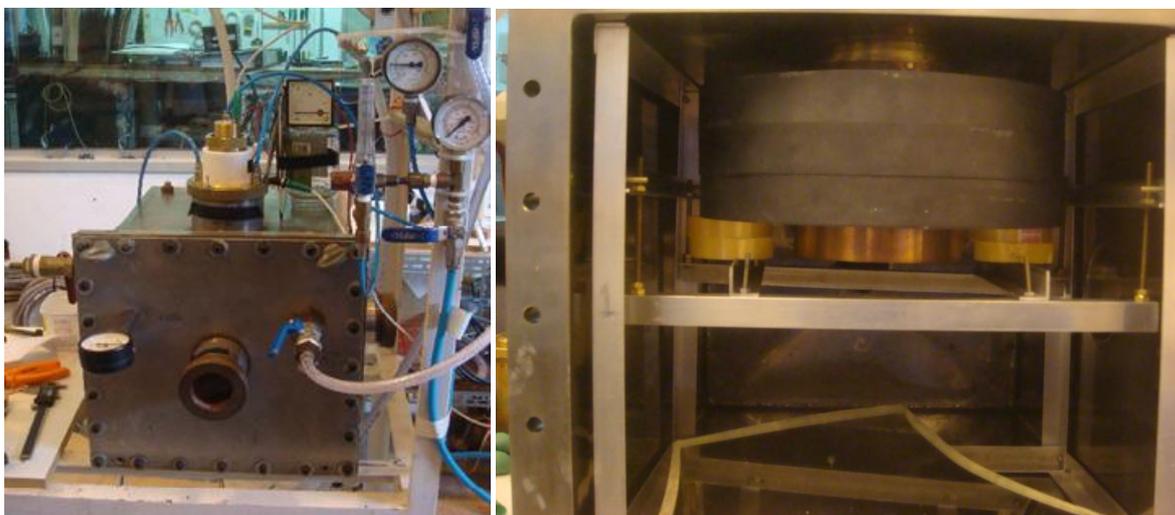


Figura 26 – A esquerda, o reator fechado com o MGA instalado na parte superior. O ímã ficou dentro do reator, envolta do tubo de cobre que constitui o ânodo, visto na imagem da direita com a tampa lateral retirada.

O funcionamento deste cátodo (Figura 25), com o ânodo com diâmetro de 77 mm, é mostrado na Figura 27. Entretanto, o desempenho com este cátodo, embora razoável, apresentou problemas, pois o pé do arco não ficava estável na mesma região, mudando constantemente a sua posição na superfície do cátodo. Isto pode ser visto na Figura 27. O ponto brilhante no cátodo é chamado de *cátodo spot*.

Com o intuito de melhorar a estabilidade do cátodo spot, a seguir, retirou-se uma porção da região central do cátodo cônico, gerando-se uma região cilíndrica na parte central (tal protótipo de cátodo não está mostrado nas figuras). No entanto, o resultado não apresentou progressos significativos, pois o arco ficou oscilando entre a região plana e a região cônica.

Partiu-se, então, para fazer uma mudança significativa no cátodo. Inicialmente, foi testado um entalhe em forma de U relativamente pequeno na superfície cilíndrica do cátodo, como mostrado no Protótipo 2 (Figura 24b). Os resultados com o Protótipo 2 foram satisfatórios, com o arco estabilizando-se dentro do canal entalhado. O sistema com esta configuração passou a ser chamado de plasma de arco deslizante

magnético com um cátodo cilíndrico entalhado (MGA-CCE). A Figura 28 mostra o plasma em funcionamento.

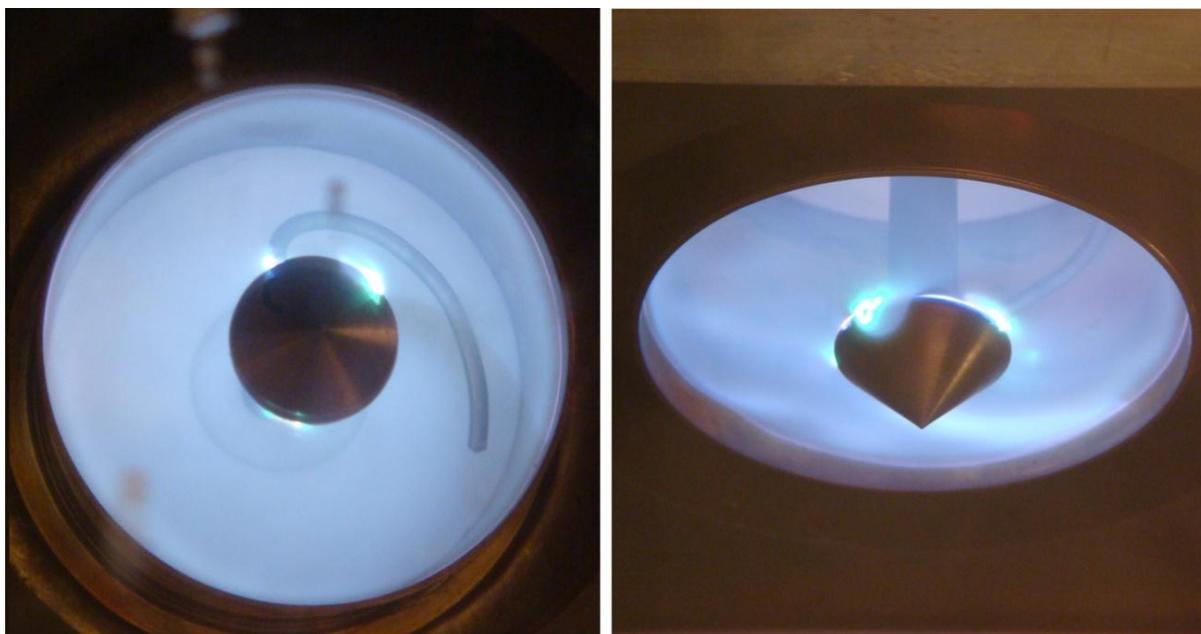


Figura 27 – Imagem frontal e lateral do plasma de um MGA de duplo cone (Protótipo 1) com diâmetro do ânodo de 77 mm, onde pode-se observar as mudanças de posição do cátodo spot.

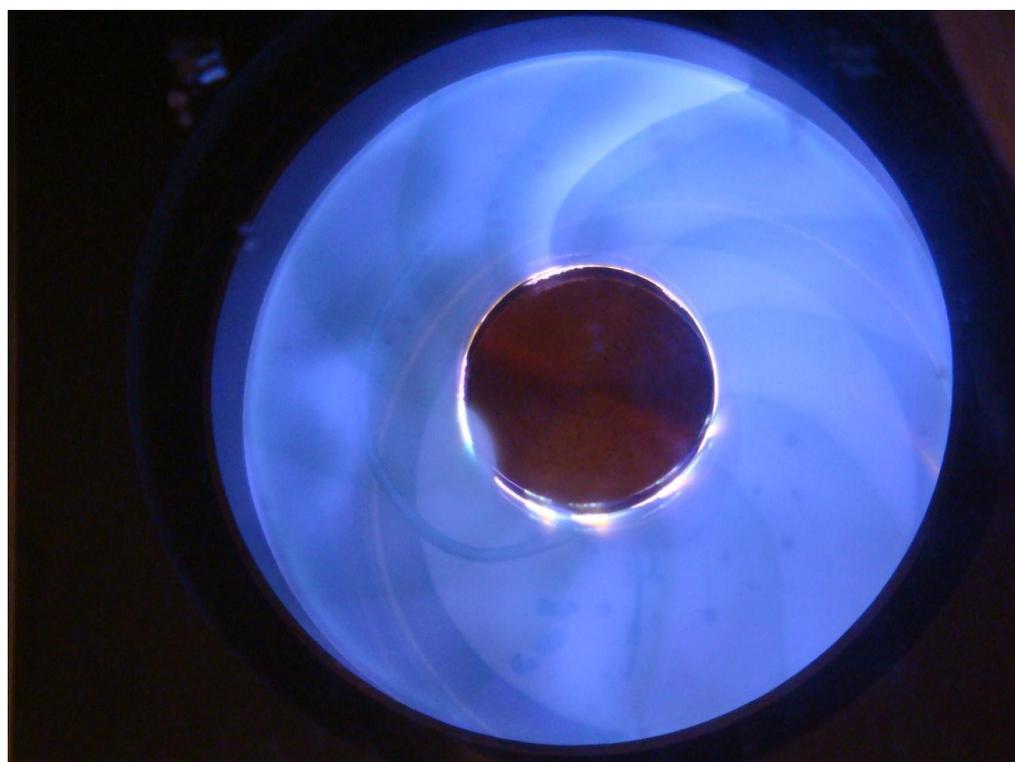


Figura 28 – Protótipo 2 com um pequeno entalhe na superfície cilíndrica do cátodo, onde se pode observar o brilho do cátodo spot na região entalhada do cátodo, indicando uma melhor estabilidade do arco.

O funcionamento do MGA-CCE foi melhorado, variando-se apropriadamente a geometria do entalhe (em inglês, *notch*), sendo verificado que uma profundidade maior do canal do entalhe melhorava consideravelmente a estabilidade do arco. Testaram-se entalhes com seções retangulares e, assim, a geometria onde se conseguiu bons resultados de estabilidade é mostrada na Figura 24c. (Protótipo 3). Neste protótipo, o canal do cátodo entalhado tem largura de 6.0 mm e profundidade de 6.0 mm.

Um desenho esquemático geral do MGA-CCE desenvolvido (usando-se o Protótipo 3) é mostrado na Figura 29.

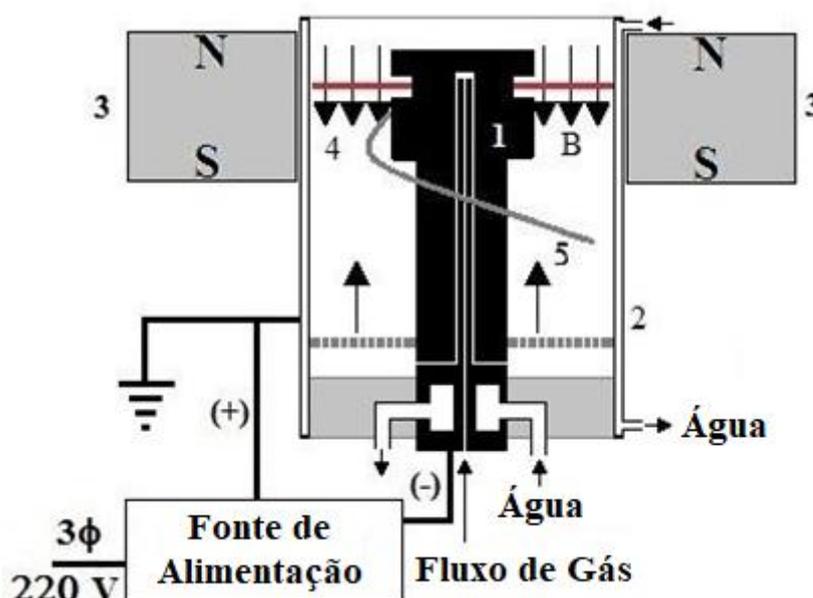


Figura 29 – Diagrama esquemático do MGA-CCE desenvolvido com o Protótipo 3, em que o cátodo entalhado possui uma seção retangular. 1: cátodo entalhado; 2: ânodo; 3: ímãs permanentes; 4: direção e sentido do campo magnético; 5: fio condutor rígido para ignição do arco.

Em suma, se verificou que com um canal na superfície do cátodo, o arco tende a ficar dentro dele e com maior estabilidade; o que é uma importante inovação introduzida aqui. Assim que o arco entra no canal, ele fica bem mais estável. Isto também permitiu aumentar com maior estabilidade o diâmetro do ânodo para 102,0 mm. A limitação do diâmetro em 102,0 mm é devido ao diâmetro dos ímãs comerciais encontrados.

Com a melhoria da estabilidade do arco, foi possível trabalhar com o plasma por tempos maiores. Entretanto, com maior tempo de operação, pode levar ao

superaquecimento do ânodo, provocando a quebra dos ímãs geradores de campo magnético, se o mesmo não for resfriado. Para evitar quebras e possível desmagnetização dos ímãs de ferrite, o Protótipo 3 possui eletrodos refrigerados. O ânodo é integralmente refrigerado por água. O cátodo é refrigerado por água na base, e pelo gás de trabalho em toda a extensão interior, inclusive próximo à região onde o arco é gerado, antes do gás de trabalho ser injetado na região entre o cátodo e ânodo. Os ímãs ficam do lado de fora do reator e o gerador de plasma é montado na tampa lateral do reator. A Figura 30 mostra o aparato montado na lateral direita do reator, onde podem ser vistos os três ímãs de ferrite que geram o campo magnético, usado para provocar o giro do arco elétrico.

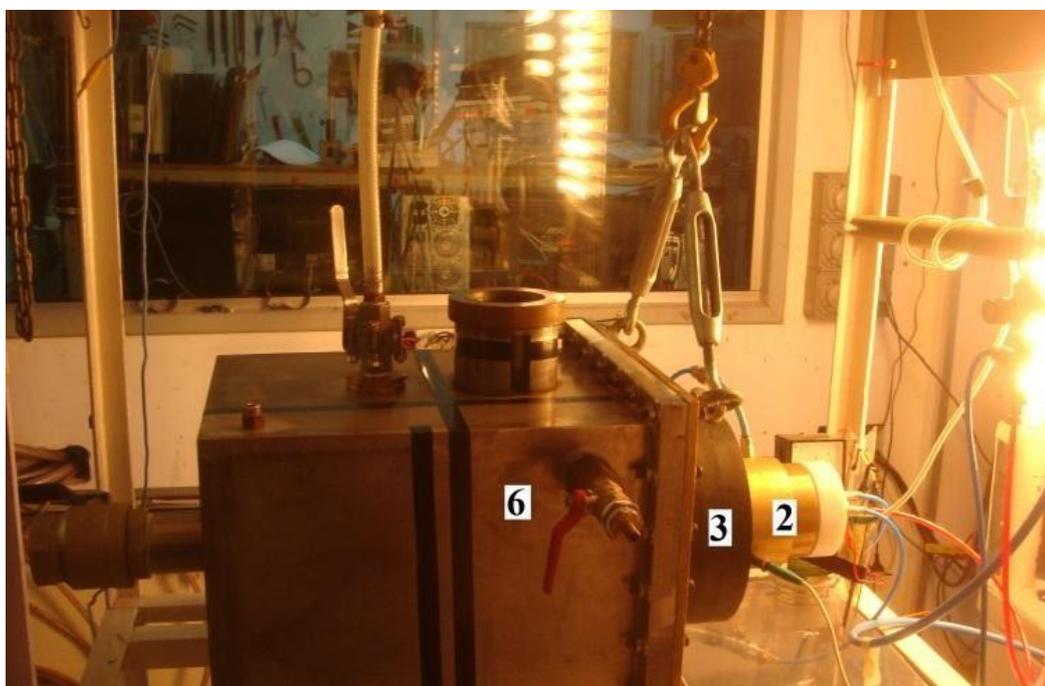


Figura 30 – Plasma de arco deslizante magnético desenvolvido com um cátodo cilíndrico entalhado (MGA-CCE) montado na tampa lateral do reator, com ânodo e a base cátodo refrigerados com água. 2: ânodo; 3: ímãs permanentes; 6: reator; O cátodo (1), a direção e o sentido do campo magnético (4), e o fio condutor rígido para ignição do arco (5) não são mostrados nesta foto.

A Figura 31 mostra o MGA-CCE plasma desenvolvido, funcionando com o reator aberto, isto é, operado em ar à pressão atmosférica. O gás de trabalho poder ser ar comprimido,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ou outros gases. No teste mostrado foi usado  $CO_2$  como gás de trabalho. Desse modo, o plasma e o ambiente são uma mistura de ar e  $CO_2$  (este último em menor proporção). O diâmetro do ânodo foi de 102,0 mm, com tensão de 1,5 kV e corrente de 400 mA.

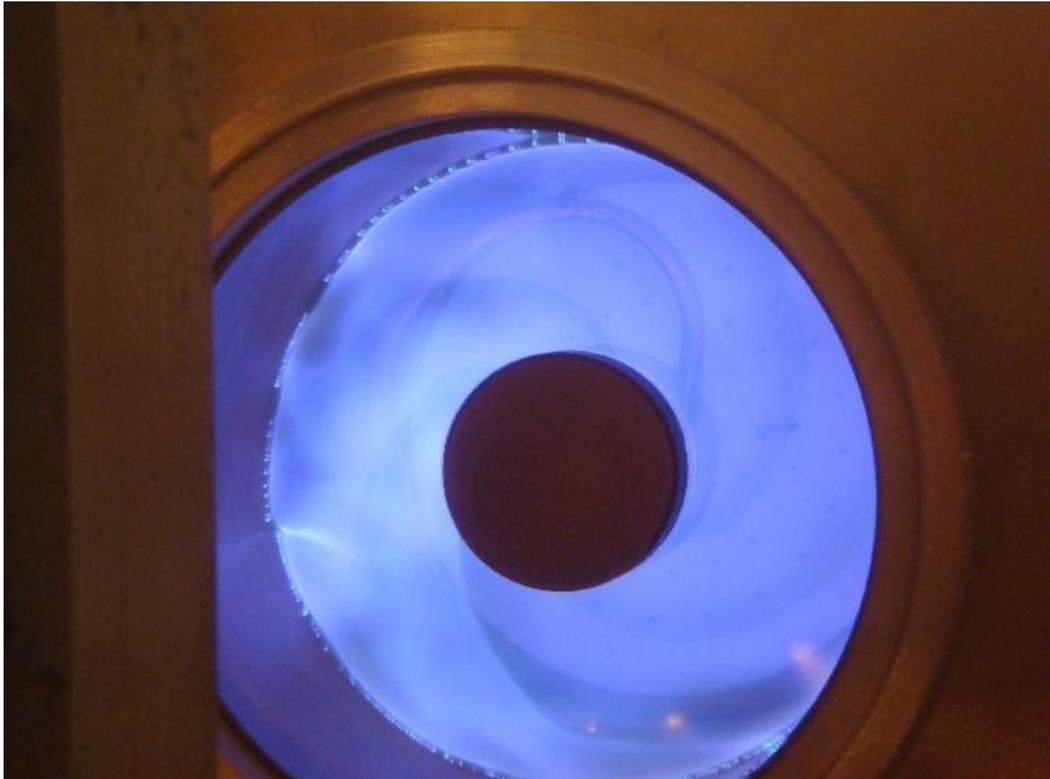


Figura 31 – Foto do disco de plasma no MGA-CCE desenvolvido (Protótipo 3), operando em ar à pressão atmosférica e  $\text{CO}_2$  como gás de trabalho. O diâmetro interno do ânodo foi 102 mm.

A Figura 32 mostra em detalhes o interior do canal na superfície do cilindro de cobre, após os testes. Pode-se observar que o arco ficou restrito no fundo do canal, pois houve um leve aquecimento do cátodo na região do pé do arco, provocado pelo bombardeamento de íons sobre a superfície. O projeto é mostrado na Figura 33.

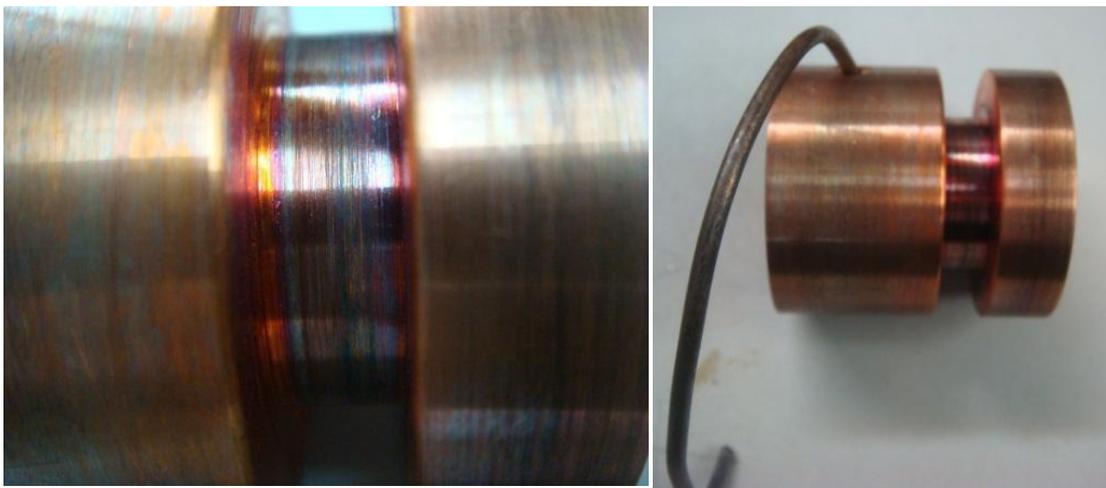


Figura 32 – A esquerda, vista do fundo do canal do cátodo do Protótipo 3 após os testes, mostrando as marcas produzidas pelo pé do arco. A direita, o protótipo 3 com o fio condutor rígido para ignição do arco.

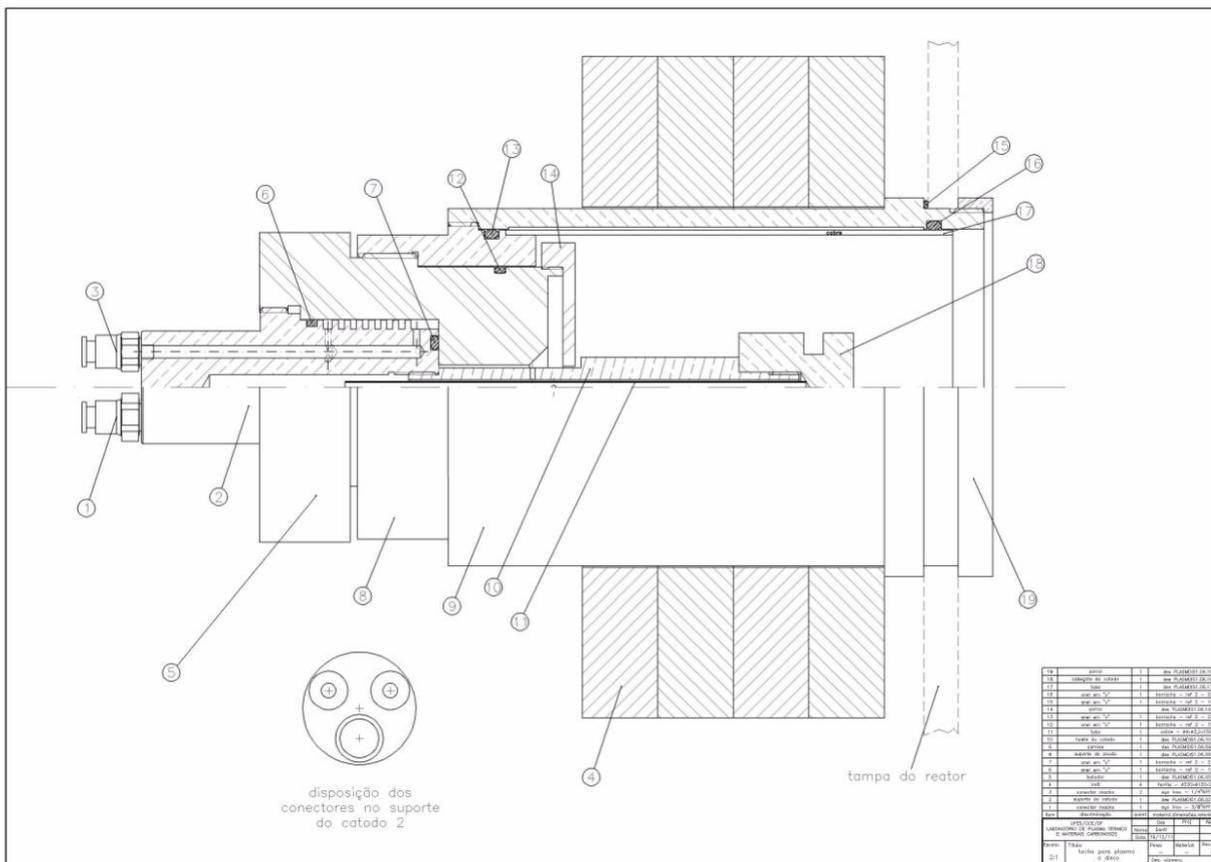


Figura 33 – Desenho atual do plasma em disco desenvolvido no projeto.

### 3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA PLASMAS

Primeiramente, convém mencionar que um requisito importante no funcionamento dos plasmas é a boa estabilidade da fonte de alimentação DC e o comportamento da curva característica Tensão x Corrente. Se for simplesmente utilizado um retificador de onda completa com dois diodos e um transformador monofásico com tap central, a tensão será pulsada, indo duas vezes a zero a cada ciclo da tensão de entrada. Isto faz com que o arco elétrico se interrompa, crie falhas no disco e diminua a estabilidade do disco de plasma. Deste modo, para melhorar a estabilidade da tensão e corrente, utilizou-se aqui um transformador trifásico de 220 V x 10 kV com potência máxima de 10 kVA, com ponte retificadora de corrente. Essa fonte de alimentação possui uma variação máxima de 5% em relação à tensão máxima. A ponte retificadora foi feita com seis diodos, sendo que, cada diodo de alta tensão é composto pela associação em série de 40 diodos IN4007, imersos em resina poliéster.

Para que se pudesse variar a tensão de saída, em aberto da fonte, foi instalado na entrada do transformador trifásico, um autotransformador trifásico (Variac) com saída variável. Para que a curva característica  $V \times I$  da fonte tivesse um comportamento descendente, foi utilizado um resistor de lastro constituído de 62 lâmpadas incandescente de 100 W / 220 V, em série. O esquema do circuito elétrico da fonte pode ser visto na Figura 34.

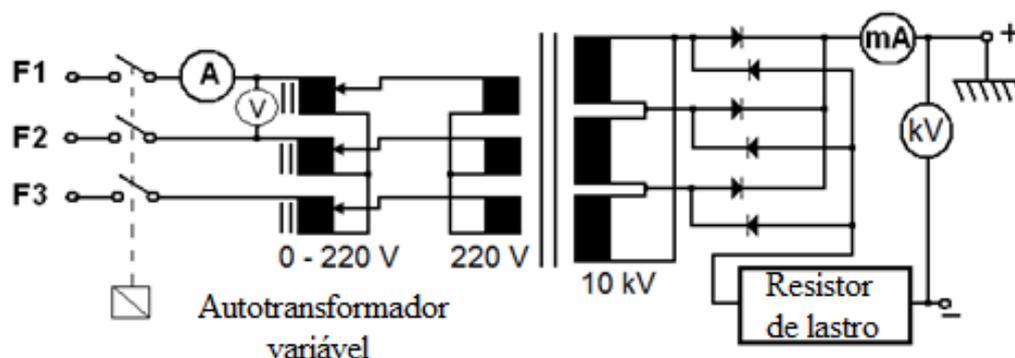


Figura 34 – Diagrama elétrico esquemático da fonte de alimentação construída.

A importância de um comportamento descendente na curva  $V \times I$  da fonte é bem discutida por Esibyan e seus colaboradores (ESIBYAN; LEVANT; ERMOLYEV, 1973). A estabilidade do arco é garantida apenas se uma condição for obedecida, a que leva em conta a relação entre os ângulos de inclinação das curvas características volt-ampère, do arco e da fonte, no ponto de interseção (que é o ponto de operação estável do arco). A condição de estabilidade do arco é garantida quando a derivada local da curva característica do arco (no ponto de interseção) é maior que a da fonte. Isso significa que, se o arco tentar aumentar a corrente acima do ponto de uma operação estável, a fonte não fornecerá a tensão necessária para isso, que, por outro lado, é bom para manter a estabilidade. Este comportamento pode ser visto na Figura 35. A Figura 36 mostra o efeito do aumento do fluxo do gás de plasma que diminui a temperatura, conseqüentemente, aumentando sua resistência. Para compensar isto, há um aumento da tensão nos eletrodos.

Como mostrado por Esibyan (ESIBYAN; LEVANT; ERMOLYEV, 1973), um comportamento descendente na curva  $V \times I$  da fonte pode ser alcançado experimentalmente, por exemplo, colocando em série com a saída de uma fonte de tensão constante, um resistor de lastro (*Ballast resistor*). Assim, a curva tensão-corrente do conjunto passa a ser descendente.

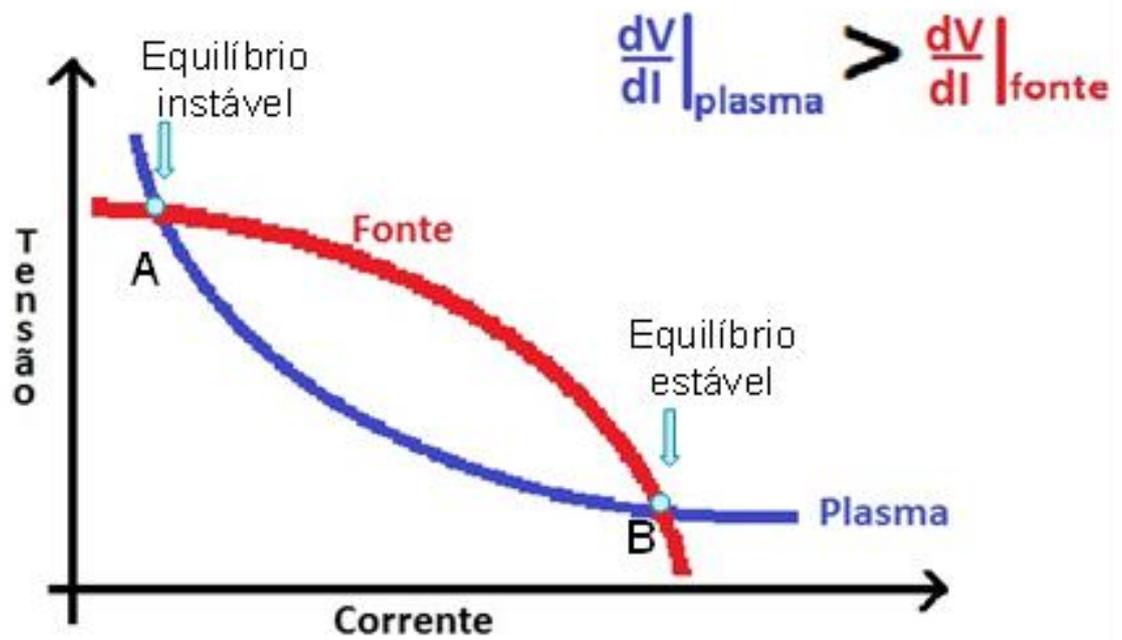


Figura 35 – Ponto de operação de uma fonte de alimentação para tochas de plasmas.

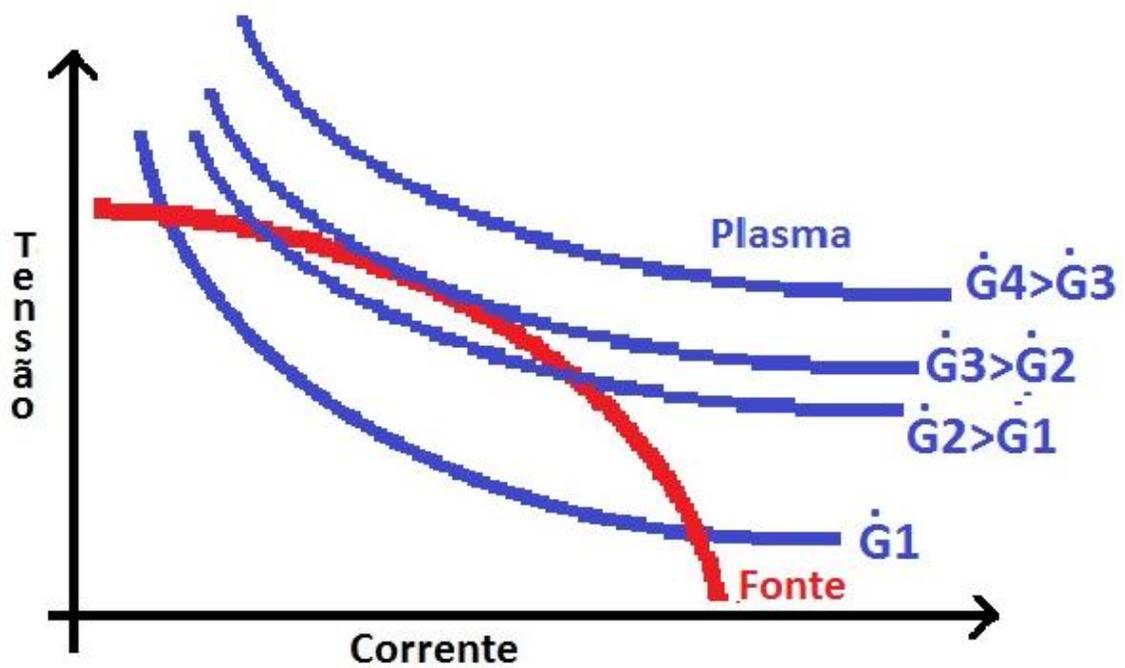


Figura 36 – Efeito da vazão no comportamento da curva característica  $V \times I$  de um plasma térmico e intermediário.

A Figura 37 e a Figura 38 mostram as partes da fonte de alimentação ao lado do reator.

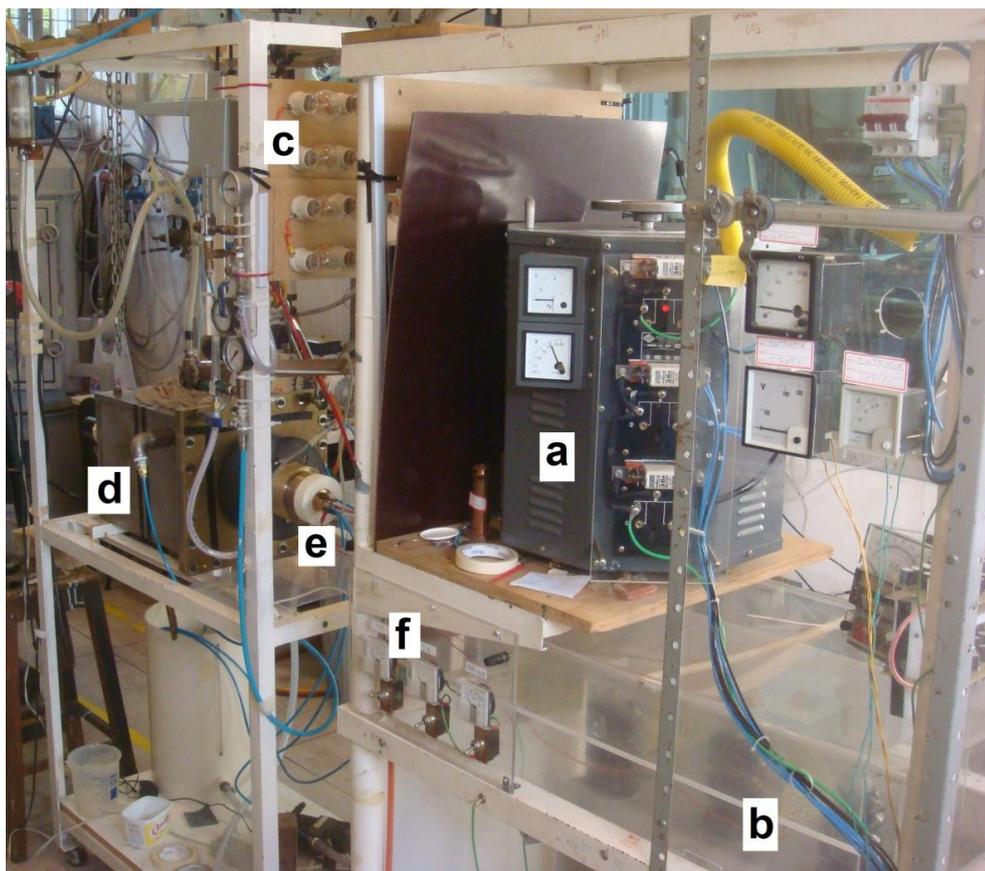


Figura 37 – Vista geral da fonte de alimentação e o reator: a – *Variac*; b – transformador para 10 kV com ponte retificadora; resistor de lastro; d – reator; MGA e f - medidores de corrente.

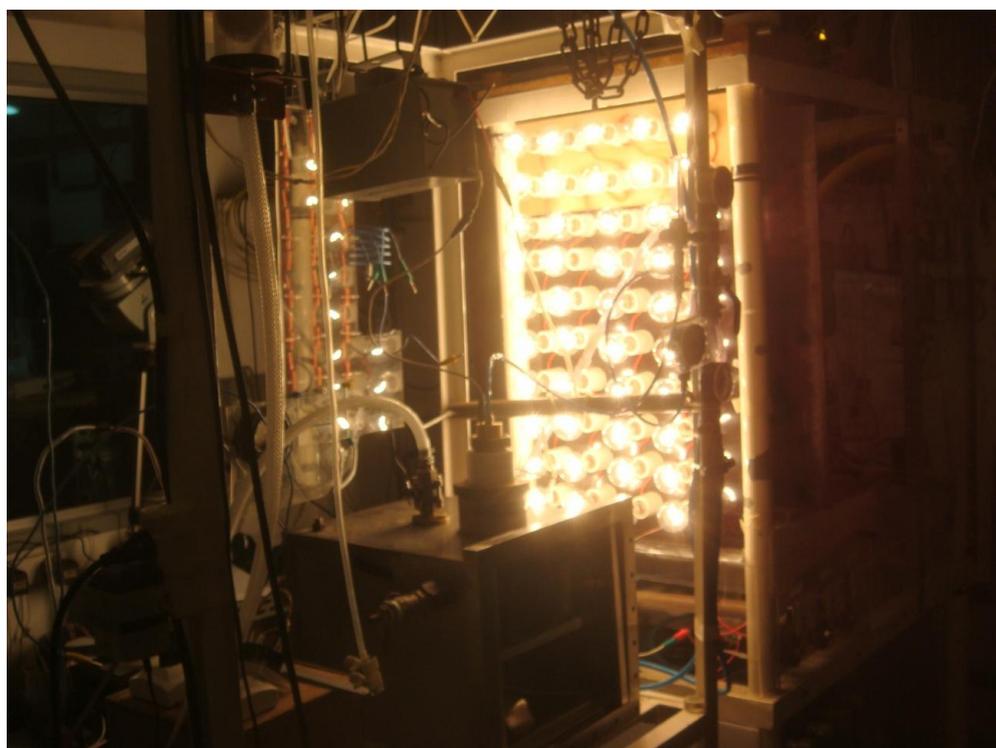


Figura 38 – Foto do resistor de lastro durante o funcionamento do plasma.

### 3.3 DISPOSITIVO PARA MEDIR A FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO, E MEDIDAS DE OUTROS PARÂMETROS ELETROMAGNÉTICOS

A frequência de rotação do arco do MGA pode ser medida com uma câmera de alta velocidade (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a; WANG et al., 2018). No entanto, um sistema de medição de baixo custo foi empregado aqui. Este sistema utiliza um dispositivo eletro-óptico com um conjunto de seis resistores dependentes da luz (LDR, *Light Dependent Resistor*) e uma lente convergente, como mostrado na Figura 39. Os LDRs usados (FR-05) têm 5,0 mm de diâmetro (Figura 40); o tempo de subida e o tempo de queda da resposta do LDR foram medidos, independentemente, com uma luz externa e são de cerca de 2 e 10 ms, respectivamente. A lente está localizada entre o plasma e os LDRs a uma distância equivalente ao seu centro de curvatura. Uma imagem real é formada na tela. Esta imagem é invertida e apresenta o mesmo tamanho que o objeto. A tela foi feita com uma folha de papel com orifício retangular, onde foram inseridos os LDRs. A folha de papel é importante para focar a posição da imagem e localizar corretamente a posição dos LDRs. A Figura 40 mostra a imagem do LDR usado.

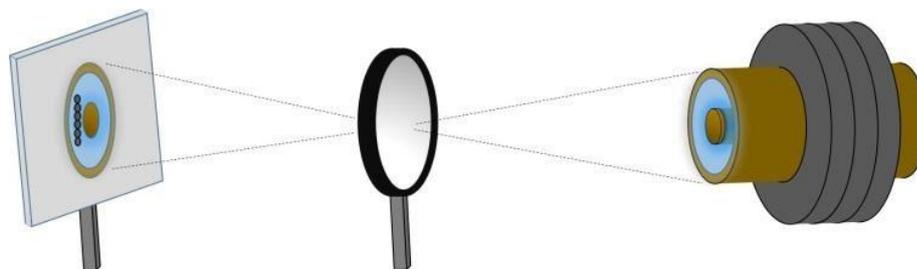


Figura 39 – Posicionamento dos LDRs no ponto de formação da imagem do plasma.

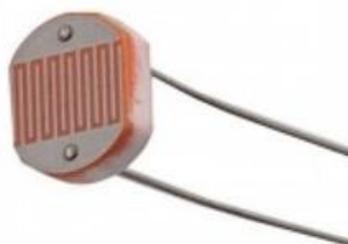


Figura 40 – Imagem do LDR usado.

Cada um dos seis LDRs foi ligado em série a um resistor de 82 kΩ e alimentados com uma fonte regulada de 5.0 V DC. Foi usada uma placa de aquisição rápida, PCI 1710, instalada em um microcomputador, para a leitura da tensão nas extremidades dos resistores de 82 kΩ. Convém observar que a placa de aquisição de dados pode ser substituída por um osciloscópio digital. Dessa forma, o aumento da luminosidade no LDR provoca um aumento proporcional da tensão, que é medida pela placa de aquisição de dados. O circuito elétrico dos LDR's é mostrado na Figura 41.

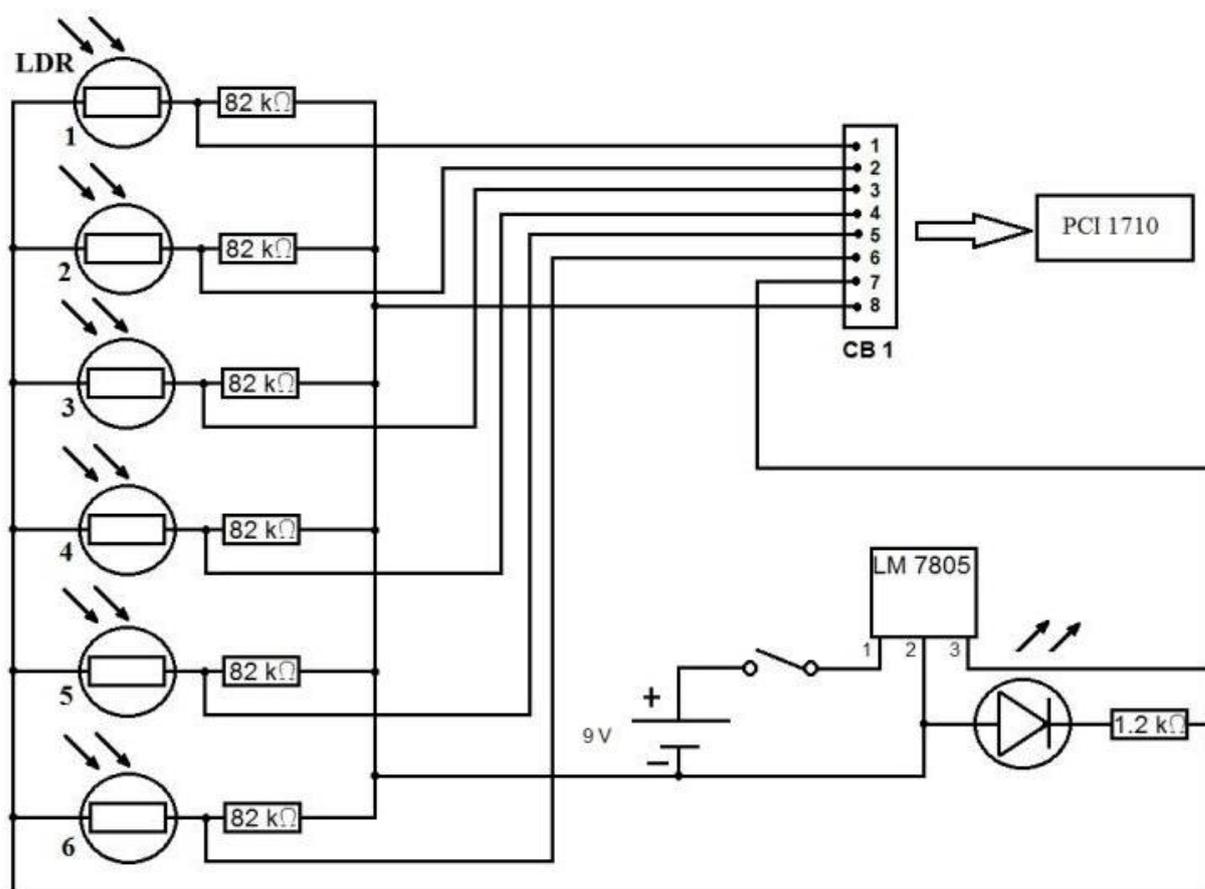


Figura 41 – Circuito elétrico para monitorar o giro do arco usando LDRs.

Observou-se que as medidas de tensão dos LDRs localizadas nas posições centrais (3ª e 4ª LDR), mais próximas do cátodo, são as que apresentam melhor desempenho (o sinal do 3º LDR é mais regular e mais claro que os demais). Portanto, o terceiro circuito LDR foi escolhido para representar o sinal de tensão (proporcional à luminosidade) em função do tempo. A Figura 42 mostra em detalhes a montagem eletrônica que foi usada no trabalho.

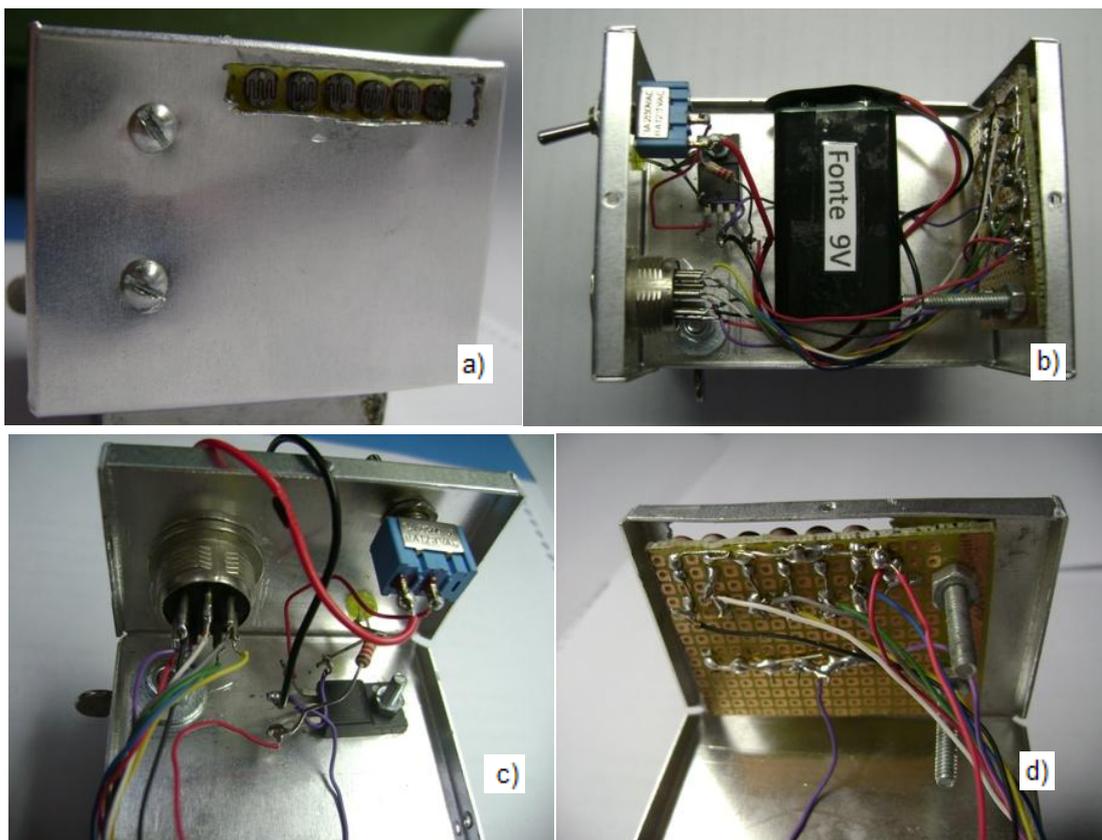


Figura 42 – a) Vista frontal, onde aparecem os seis LDRs; b) vista superior, onde aparece a bateria de 9,0 V e o regulador de tensão; c) vista interna, lado esquerdo com o conector de saída, d) vista interna lado direito, com a placa de circuito impresso onde foram afixados os LDRs.

A frequência de rotação do arco é determinada indiretamente. Primeiro, a variação de tensão no resistor em série com o terceiro LDR é obtida, em função do tempo; então, uma transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) do sinal é realizada para determinar a frequência de rotação do arco.

### 3.4 MEDIÇÕES DE TENSÃO, CORRENTE E CAMPO MAGNÉTICO

As medições de tensão e corrente foram realizadas com galvanômetros analógicos (voltímetro com fundo de escala de 15,0(1) kV e amperímetro de 500(5) mA)). Este procedimento foi realizado para evitar a influência de picos espúrios gerados por variações repentinas de tensão e corrente do arco, que ocorrem no processo de reconexão do arco, existente neste tipo de plasma.

O campo magnético na região do arco elétrico foi medido com um teslameter (Phywe, precisão de 4%, na escala de 200 (8) mT) usando uma sonda Hall axial

(com 6,0 mm de diâmetro). As medidas foram feitas a partir do centro (raio  $r = 0$ ) até  $r = 48,0$  mm em passos de 1,0 mm. O raio máximo usado foi limitado a 48,0 mm (em vez de 51,0 mm) devido ao diâmetro da sonda Hall usada.

### 3.5 CAMERA DE ALTA VELOCIDADE

Foram feitas algumas imagens do deslocamento do arco elétrico usando uma câmera de alta velocidade, marca FASTEC, modelo IL3. As imagens foram configuradas com uma taxa de 599 quadros por segundo (QPS), porém não realizadas em conjunto com as medidas usando os LDRs. Para observar o arco com mais detalhe, foi registrado somente um pedaço da parte superior do disco, com a câmera colocada a uma distância de 50 cm em frente do MGA-CCE. A região observada é mostrada na Figura 43.



Figura 43 - Seção do disco de plasma escolhida para observar o arco elétrico.

## 4 RESULTADOS

O primeiro resultado, fundamental para a apresentação dessa tese, foi o desenvolvimento de uma fonte de plasma intermediário, do tipo *Plasma Disk* com diâmetro de 102 mm, em que foi preciso desenvolver uma nova configuração de cátodo.

### 4.1 PERFIL DO CAMPO MAGNÉTICO NA REGIÃO DO ARCO ELÉTRICO

A Figura 44 apresenta o perfil do campo magnético medido na região do arco elétrico, sendo que, a coleta de dados foi feita em intervalos de 1.0(2) mm. O raio máximo medido foi limitado em 48 mm, devido às dimensões da sonda axial ( $\phi = 4.0$  mm). O gráfico mostra que o campo magnético aumenta de forma não linear com o aumento do raio. No gráfico está indicado o valor do campo magnético na região da superfície do cátodo (raio de 11 mm), sendo o valor do campo magnético de 50,6 mT.

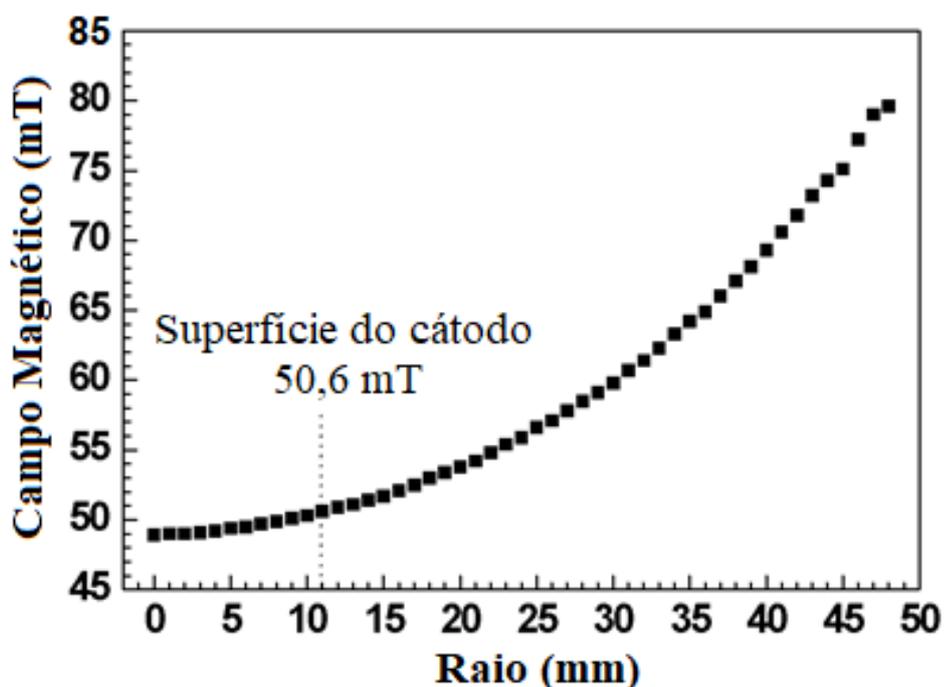


Figura 44 – Perfil do campo magnético ao longo do raio, dentro dos três imãs na região do arco elétrico.

## 4.2. CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO X CORRENTE

Na Figura 45 são mostradas as curvas características Tensão x Corrente e Potência x Corrente para dois valores de vazão do gás CO<sub>2</sub>. Nele pode-se observar o comportamento de aumento da tensão e potência com o aumento da vazão do gás de trabalho. O comportamento descendente da curva Tensão x Corrente indica um comportamento da descarga como sendo transição *glow* para arco, pois os pontos coletados não mostram um comportamento polinomial definido, ajustando-se mais facilmente a um comportamento linear.

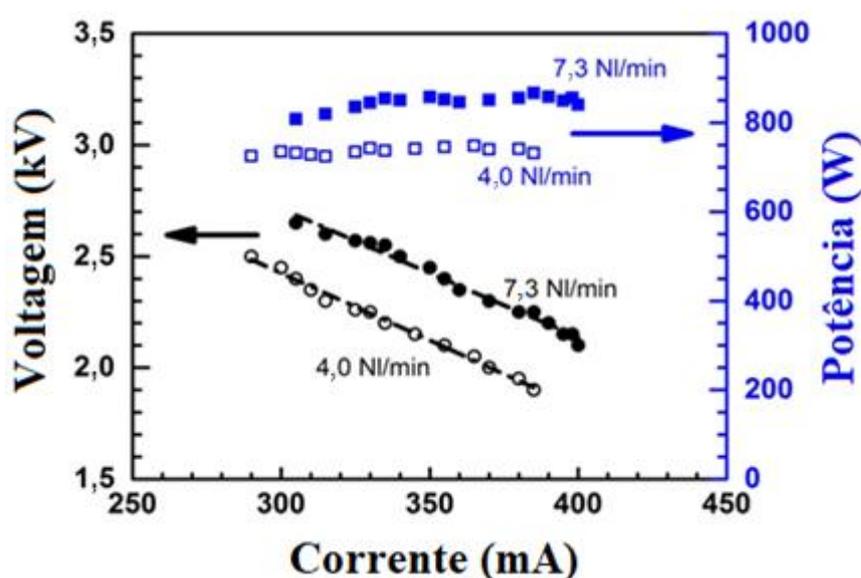


Figura 45 – Curvas características da Tensão x Corrente e Potência x Corrente para dois valores de vazão do gás de trabalho CO<sub>2</sub>, para o MGA-CCE com diâmetro do ânodo de 102,0 mm.

## 4.3. FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO ELÉTRICO

A Figura 46 mostra o sinal de tensão em função do tempo no resistor do terceiro LDR, durante um intervalo de tempo de 1,00 s. Pode-se observar que o sinal é periódico, com flutuações nas intensidades máxima e mínima. A Figura 47 detalha a medição de tensão por um intervalo de tempo de 0,10 s. Aumentos rápidos na tensão e decaimentos exponenciais subsequentes são observados devido à passagem do arco. Como o intervalo de tempo entre dois picos do disco de plasma é de cerca de 28 ms, e o tempo de subida e queda da resposta do LDR usado são mais curtos, o LDR é capaz de detectar a rotação do arco e medir a sua frequência.

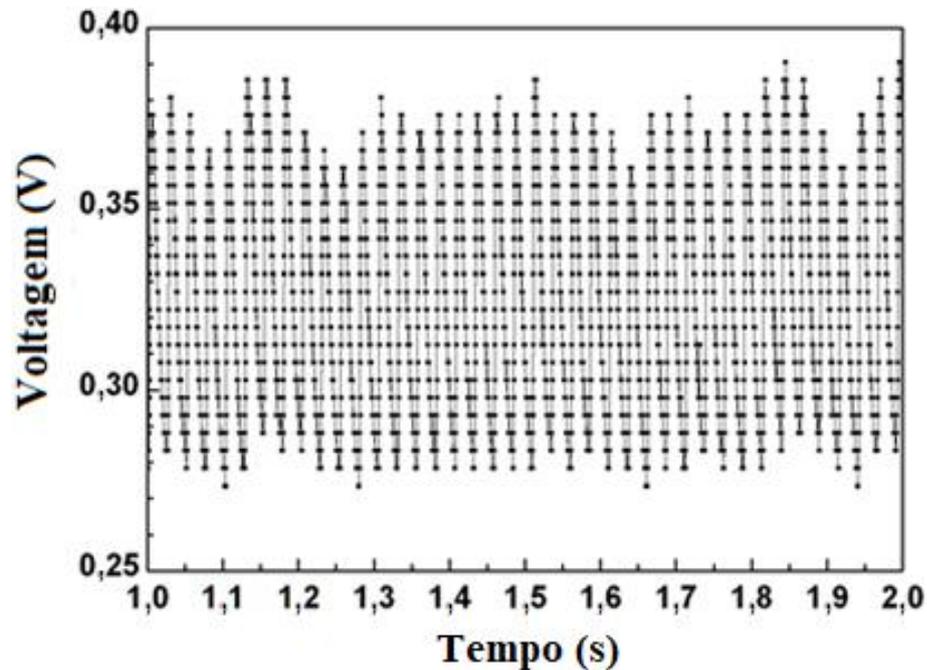


Figura 46 – Comportamento da tensão em um intervalo de 1,00 s no LDR central do dispositivo eletro-óptico de medir a frequência.

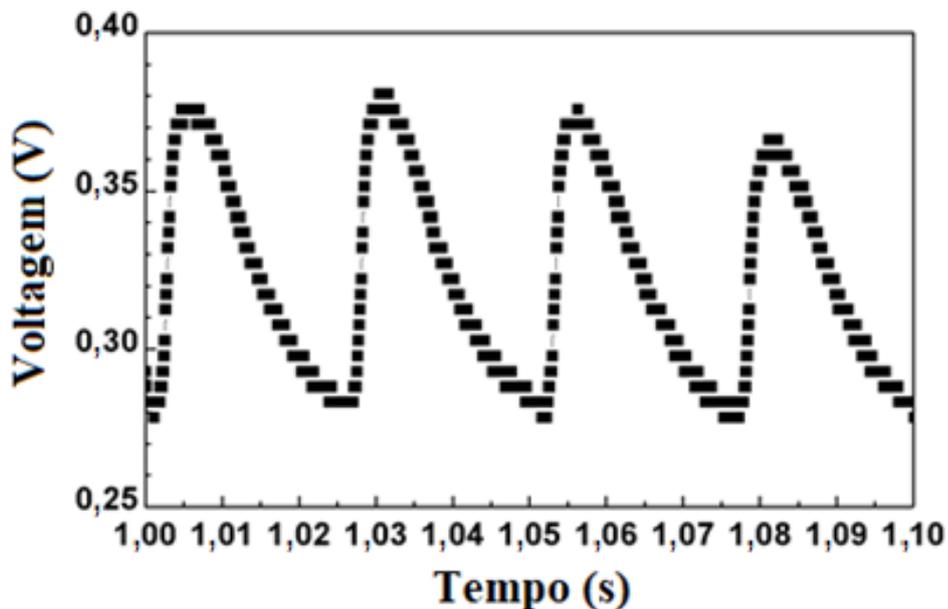


Figura 47 – Detalhe do comportamento da tensão no LDR central do dispositivo eletro-óptico usado para determinar a frequência.

Depois de obter os resultados da Figura 46, a frequência de rotação do arco foi calculada usando uma FFT aplicada no sinal de tensão no resistor do 3º LDR, como uma função do tempo. Uma análise FFT para o teste com a corrente de 400 mA é mostrada na Figura 48. Os picos que mostram a frequência principal e seus

harmônicos estão bem definidos. A frequência de rotação do arco deste teste pode ser quantificada em  $(39,0 \pm 1,3)$  Hz. A incerteza de frequência foi considerada como a metade da largura total à meia altura (HWHM, *Full Width at Half Maximum*) do harmônico principal.

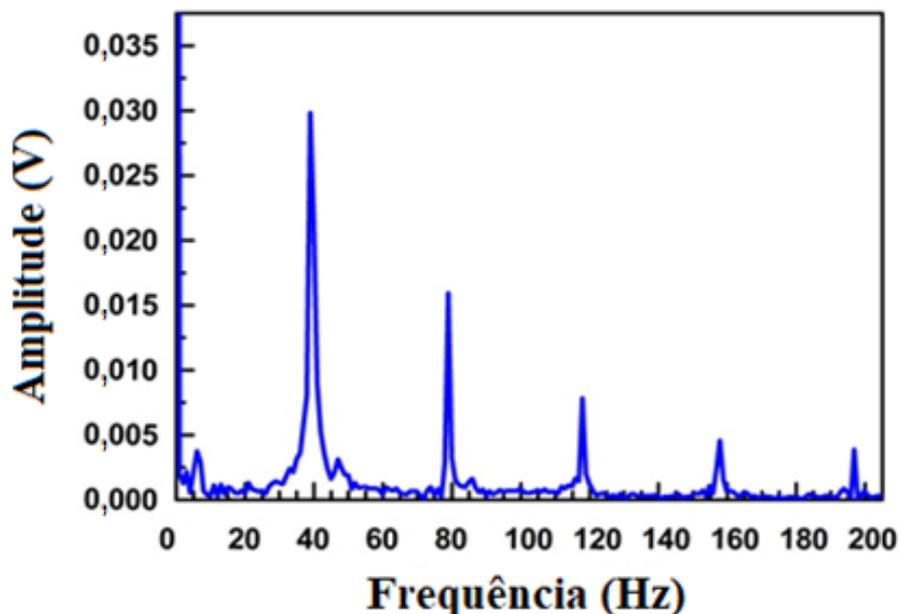


Figura 48 – Transformada rápida de Fourier (FFT) da tensão em função do tempo, no resistor do 3º LDR por um intervalo de 1 s, para o teste com a corrente de 400 mA.

Os valores da frequência de rotação do arco em função da corrente elétrica foram obtidos em quatro testes nos quais o MGA-CCE estava muito bem estabilizado e operando a uma vazão de  $7,3 \text{ N}\ell / \text{min}$  do gás de trabalho. Os resultados  $f \times I$  do presente trabalho são mostrados na TABELA 3, e na próxima seção, serão confrontados com outros trabalhos.

TABELA 3 - FREQUÊNCIA DE GIRO DO ARCO EM FUNÇÃO DA CORRENTE NO MGA-CCE DESENVOLVIDO.

CORRENTE (mA)	FREQUÊNCIA (Hz)
298	33,5
320	35,0
380	38,0
400	39,0

#### 4.4 IMAGENS COM CAMERA DE ALTA VELOCIDADE FASTEC IL3

A Figura 49 mostra uma sequência de 4 fotos com intervalos de 1,7 ms. A primeira observação é que o arco dificilmente é radial e muda de comprimento aos saltos, pois a combinação das duas forças (força de Lorentz e força de arrasto, como será demonstrado no próximo capítulo), ao longo de todo o arco, não permite que todo ele tenha a mesma velocidade angular, fato este que o faz alongar. Devido as características da fonte, o arco deve realizar as constantes reconexões (*re-strike*) do pé do arco no ânodo para não se interromper. Apesar da coluna do arco não ser radial na região entre os eletrodos, nas superfícies dos eletrodos, o cátodo e anodo, o arco é perpendicular à superfície.

As reconexões não são muito regulares, principalmente para baixas frequências de giro do arco. Da Figura 49a para a Figura 49b houve uma grande mudança no comprimento do arco, e nas duas fotos a seguir, a mudança de posição do pé do arco no ânodo variou pouco.

Outro ponto a se destacar, é que a reconexão diminui o comprimento do arco, e isso faz diminuir sua resistência, que em contra partida, faz aumentar a corrente e diminuir a tensão do arco. Com o aumento da corrente, o campo magnético gerado pela corrente “aperta” o arco, diminuindo seu diâmetro, o qual pode ser visto na Figura 49b. A seguir, como o arco começa a aumentar seu comprimento, o diâmetro do arco volta a aumentar. Este comportamento foi reportado por Wang e colaboradores em 2018 (WANG et al., 2018), conforme Figura 50.

A Figura 51 mostra uma fotografia, tirada por uma máquina Sony TL3, em que foi capturada a imagem de um único período. Pode se notar, primeiramente, que na superfície do ânodo, são as reconexões do pé do arco que podem apresentar variações das distâncias nos intervalos entre os eventos. E nesta foto, em especial, aparecem duas situações no qual o arco chegou muito perto de ficar radial; no início e no fim da exposição.

A variação da corrente provoca variação no brilho da coluna do arco, e este comportamento pode ser a causa das variações de amplitude na parte superior da Figura 46, pois essas variações não são regulares e não acontecem nas mesmas regiões.

Foram feitas medidas do diâmetro  $d$  do arco para as quatro figuras, sendo o referencial a distância entre a superfície externa do cátodo e a superfície interna do ânodo ( $34,0 \pm 0,1$  mm). Foram encontradas:  $d = (0,59 \pm 0,07)$  mm para a Figura 49b e  $d = (3,9 \pm 0,2)$  mm para as outras três figuras.

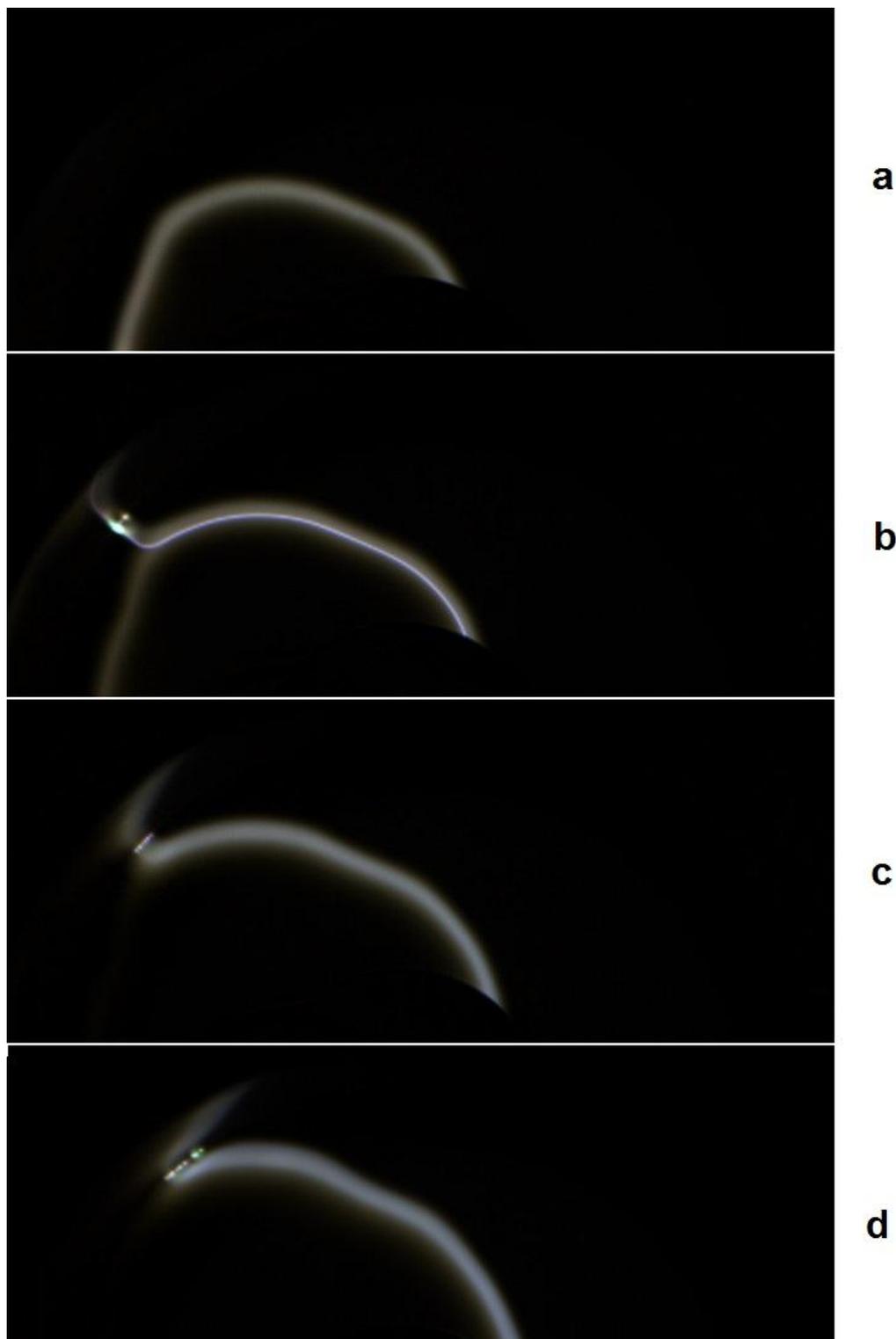


Figura 49 – Sequência de quatro fotos consecutivas do arco com intervalos de 1,7 ms.

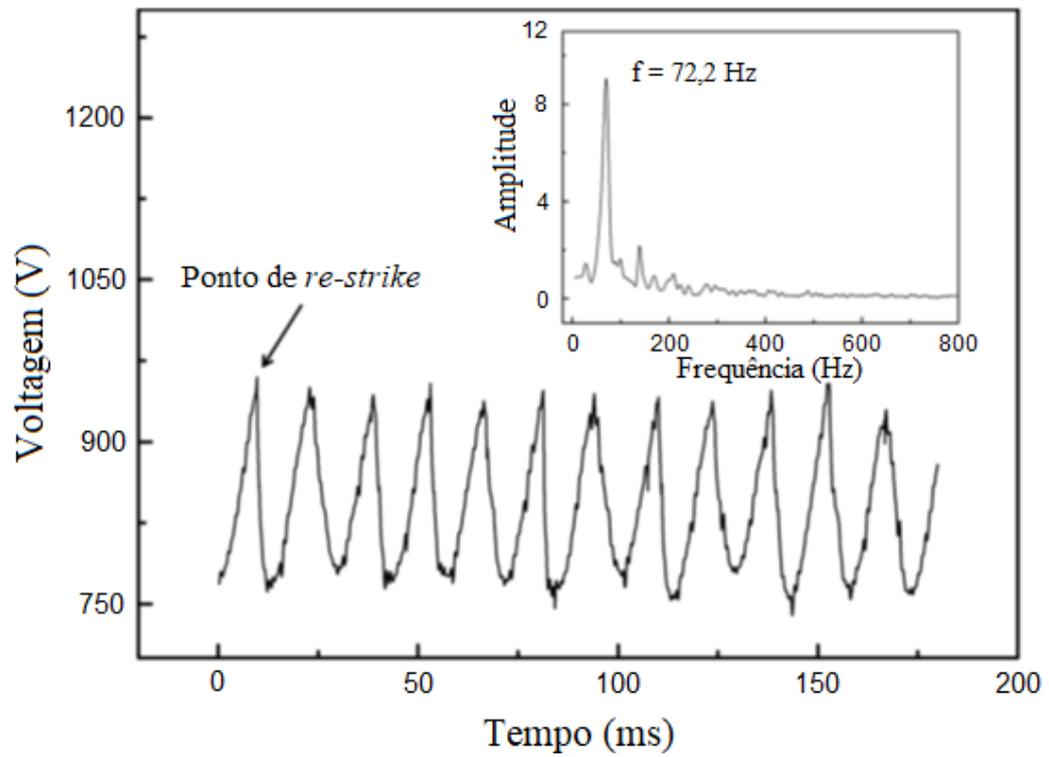


Figura 50 - Comportamento da tensão e corrente em um MGA observado por Wang e colaboradores em 2018 (WANG et al., 2018)

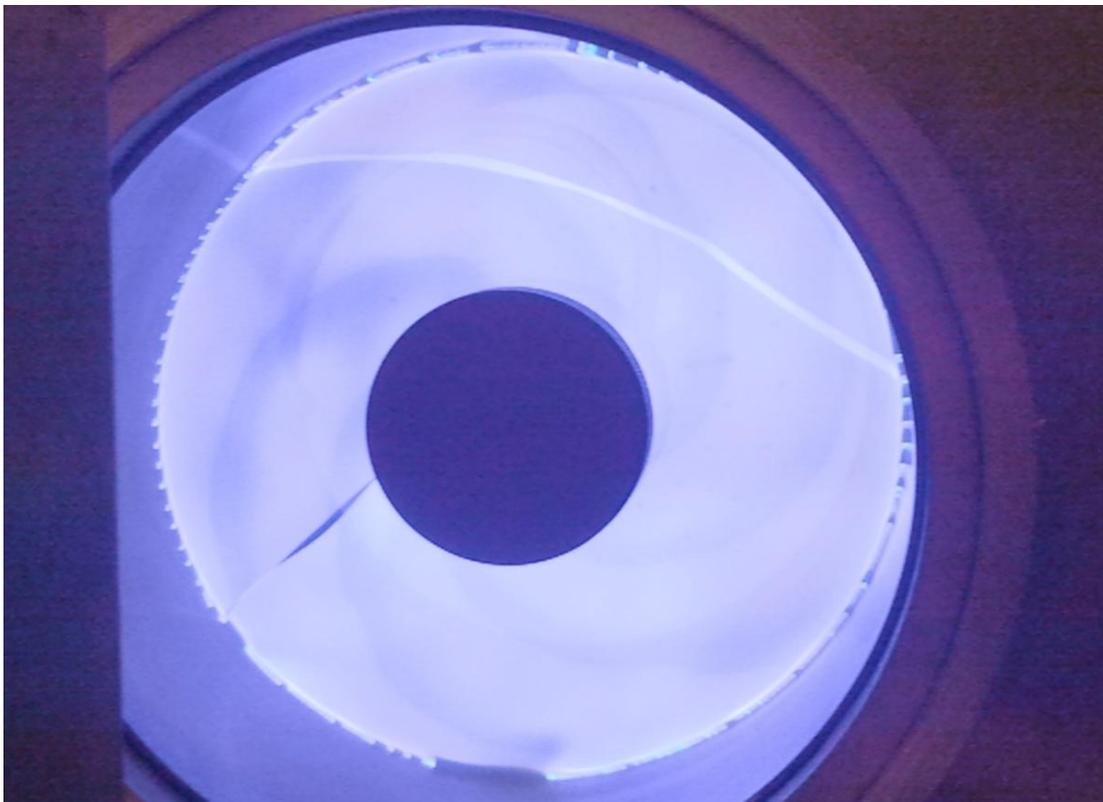


Figura 51 – Foto de um único período do arco.

## 5. DISCUSSÃO

Convém primeiramente comentar que os resultados obtidos no presente trabalho, com o desenvolvimento de um arco deslizante por campo magnético com um cátodo cilíndrico entalhado (MGA-CCE), permitiram aumentar consideravelmente a estabilidade do arco, atingindo-se comprimento mínimo de arco de 40 mm, diâmetro do disco de 102 mm, e corrente de 400 mA.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com trabalhos publicados na literatura, de dois grupos de pesquisadores, que usam MGA, como mostrado na Figura 52.

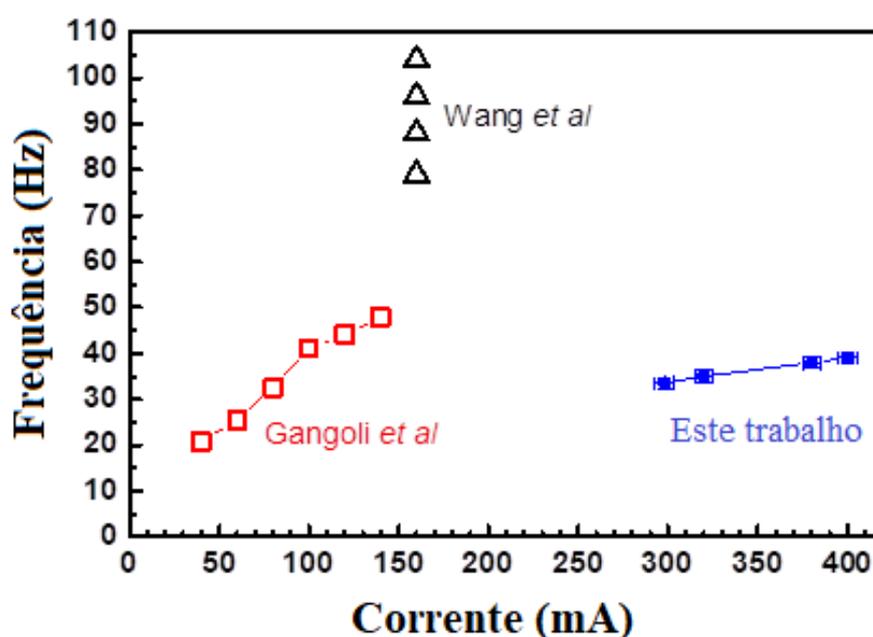


Figura 52 – Frequência de giro do arco em função da corrente elétrica dos MGA de Gangoli *et al*, Wang *et al* (WANG *et al.*, 2018) e do presente trabalho.

Os resultados obtidos por Gangoli *et al* (GANGOLI, 2007; GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a) têm frequências de 20 a 45 Hz e correntes de 40 a 140 mA. Embora Wang *et al* (WANG *et al.*, 2018) tenham usado correntes de 40 a 300 mA, eles só reportaram dados de frequência de giro em função dos diferentes campos magnéticos empregados apenas para um único valor de corrente ( $I = 160$  mA). Como esses autores informam que o MGA desenvolvido por eles, chamado de MSGAD, é mais estável para altos valores de campo magnético, iremos considerar os dados de frequência de giro do arco (79 a 104 Hz) apenas para os quatro maiores valores de campo magnético reportados (245 a 350 mT).

À primeira vista, os três conjuntos de dados mostrados na Figura 52 parecem não ter uma correlação. Mas, isso ocorre porque, além da corrente, a frequência de giro pode depender de outros parâmetros como o campo magnético e os diâmetros dos eletrodos. Gangoli *et al* usou um diâmetro de cátodo de 18 mm e ânodo de 38 mm, com campo magnético de 120 mT. Wang *et al* usou um diâmetro de cátodo de 10 mm e ânodo de 40 mm, com campo magnético variando de 70 a 350 mT. No presente trabalho, o diâmetro do cátodo foi de 22,0 mm e o do ânodo de 102,0 mm, com campos variando de 50,6 mT na superfície do cátodo até 79,6 mT em seu diâmetro máximo.

Utilizando princípios semelhantes aos empregados por Ombrello *et al* (OMBRELLO et al., 2005) e Gangoli *et al* (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a), é possível obter uma expressão geral envolvendo frequência, corrente, campo magnético, dimensões de eletrodos, e outros parâmetros, em que os resultados de diferentes MGAs podem ser numericamente comparados.

Em condição estacionária, nos MGA, o arco elétrico gira com uma velocidade angular  $\omega$  aproximadamente constante entorno do eixo do cátodo. Assim, para um dado valor da coordenada radial  $r$ , a velocidade  $v_\theta$  do arco na direção tangencial  $\theta$  é constante para cada  $r$  ( $v_\theta = \omega_\theta r = 2 \pi f r$ ). Desse modo, a aceleração nesta direção é zero. Aplicando-se a segunda lei de Newton nessa direção, temos que a componente da força resultante nesta direção, na coluna do arco, é também zero. Temos duas forças atuando na direção  $\theta$ : uma delas ( $F_a$ ) tendendo a impulsionar e acelerar o arco devido ao campo magnético e a corrente, que é a componente associada à força de Lorentz, e por outro lado, temos uma segunda força que se opõe ao movimento do arco elétrico no fluido (ar + gás de trabalho), onde ele se arrasta, que é a chamada força de arrasto ( $F_d$ ). Portanto, aplicando-se a segunda lei de Newton na direção  $\theta$ , numa dada seção do arco elétrico de diâmetro  $d$  e comprimento infinitesimal  $\delta l$ , em certo valor de raio  $r$  entre o cátodo e o ânodo, tem-se:

$$(F_a)_\theta = (F_d)_\theta . \quad (1)$$

Ao invés de aplicar esta equação para um valor intermediário de  $r$ , entre o cátodo e o ânodo, é mais conveniente aplicá-la para um valor de  $r$  bem próximo à superfície do cátodo, isto é,  $r = D/2$ , pois, nesta posição o arco é perpendicular à superfície do

cátodo e, assim, o módulo da força de Lorentz é igual à própria componente na direção  $\theta$ .

Para uma dada seção do arco elétrico, com diâmetro  $d$  e comprimento infinitesimal  $\delta l$  com  $r = D/2$ , tem-se  $(F_a)_\theta = (F_a)_{r=D/2} = I B_{r=D/2} \delta l$ , pois nesta região a corrente é paralela a direção radial. Do mesmo modo, tem-se  $(F_d)_\theta = (1/2) C_d \rho (v_\theta)^2 A$ , onde  $C_d$  é coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a densidade do fluido onde está ocorrendo o arrasto,  $v_\theta$  é a velocidade do elemento de massa na direção do arrasto para  $r = D/2$  ( $v_\theta = \omega D/2 = \pi f D$ ), e  $A$  é a área da seção transversal do elemento de massa do arco elétrico, que está sendo arrastado, isto é,  $A = d \delta l$ . Com essas considerações, aplicando-se a equação 1 numa dada seção do arco elétrico de diâmetro  $d$  e comprimento infinitesimal  $\delta l$  para  $r = D/2$ , obtém-se:

$$I B_{r=D/2} \delta l = (1/2) C_d \rho (\pi f D)^2 d \delta l, \quad (2)$$

e, assim, a frequência de giro do arco fica dada por:

$$f = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{2 I B_{r=D/2}}{C_d \rho d}} \quad (3)$$

Esta expressão é similar à obtida por Gangoli *et al* (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a). Contudo, existe uma diferença do fator 2 no numerador dentro da raiz quadrada, pois, na referência (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a) não foi usado o fator multiplicativo  $1/2$  da força de arrasto (tal como usado na (OMBRELLO *et al.*, 2005)). Outra diferença é que na equação 3 deve-se, necessariamente, utilizar para o valor do campo magnético na posição corresponde à superfície do cátodo ( $r = D/2$ ).

Uma característica importante da derivação apresentada nesta tese é especificar muito claramente que o denominador  $D$  que aparece na equação 3 corresponde ao diâmetro do cátodo e não ao diâmetro médio do cátodo-ânodo (como na referência (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010b)) ou ao diâmetro interno do ânodo (como na referência (WANG *et al.*, 2018)). A derivação também especifica claramente que o valor do campo magnético a ser usado deve ser o medido na superfície do cátodo ( $r = D/2$ ). Além disso,  $d$  é o diâmetro do arco elétrico em  $r = D/2$ .

Para que esta expressão seja aplicada a diferentes configurações de MGA num só gráfico em função da corrente, é conveniente reescrevê-la de modo que a variável independente seja apenas a raiz quadrada da corrente. Assim:

$$\frac{f D}{\sqrt{B_{r=D/2}}} = \frac{2}{\pi \sqrt{2 C_d \rho d}} \sqrt{I} = \alpha \sqrt{I}, \quad (4)$$

onde  $\alpha$  é um fator aproximadamente constante para cada tipo de MGA e densidade do gás utilizado:

$$\alpha = 2 / \pi \sqrt{2 C_d \rho d}. \quad (5)$$

Baseado na equação 4, na Figura 53 é fornecido um gráfico de  $f D / (B_{r=D/2})^{1/2}$  em função de  $I$ . Para verificar o expoente mais adequado de  $I$ , dois conjuntos de dados experimentais foram fitados com funções monomiais de potência com diferentes expoentes (“*monomial power functions with different exponentes*”), isto é, função  $y = a.x^b$ . Os melhores valores de ajustes (“*The best fitting values*”) obtidos para o expoente  $b$  foram:  $b_{\text{Gangoli et al}} = 0,703 \pm 0,049$  e  $b_{\text{Este trabalho}} = 0,508 \pm 0,015$ . Os dados

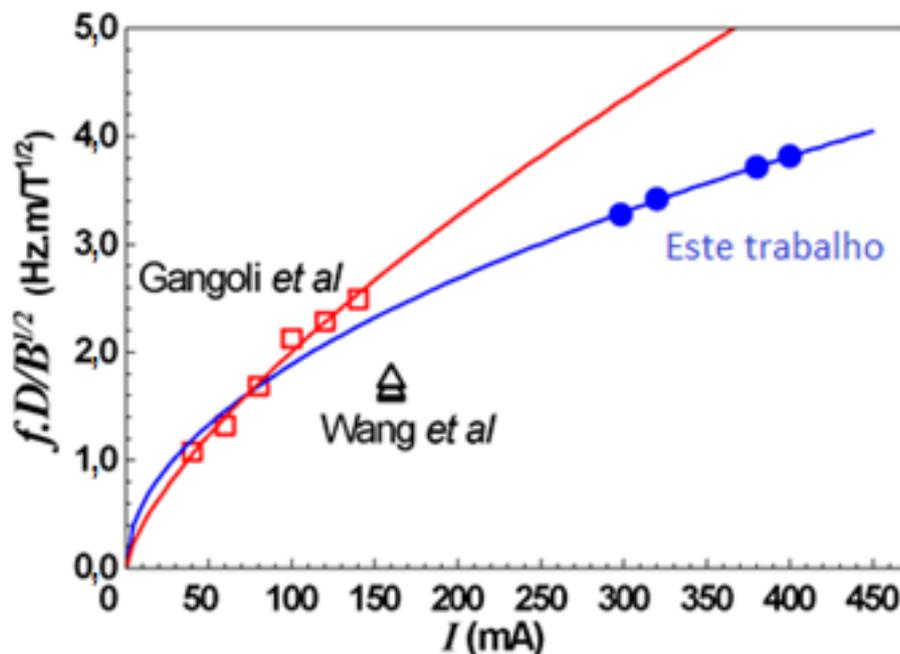


Figura 53 – Comportamento em três diferentes MGA fitados com funções monomiais de potência com diferentes expoentes (“*monomial power functions with different exponentes*”).

de Wang *et al* não puderam ser fitados, pois só existe um valor de corrente, entretanto, é interessante observar que os dados convergiram para um só local de

$f D / B^{1/2}$ , para a corrente de 160 mA. Os valores de  $b$  indicam que os resultados experimentais obtidos no presente trabalho estão em muito melhor concordância com a previsão teórica ( $b_{\text{teórico}} = 0,500$ ), quando comparados com Gangoli *et al.*

Como o expoente  $b \neq 1/2$  não fornece uma expressão teórica dimensionalmente correta, é instrutivo fazer um gráfico de  $f D / (B_r = D / 2)^{1/2}$  em função de  $I^{1/2}$ , como é mostrado na Figura 54. Observa-se claramente que os resultados experimentais obtidos no presente trabalho se ajustam muito bem com a previsão teórica, com uma reta de expoente  $1/2$  para a corrente  $I$ , passando pela origem. O coeficiente angular obtido foi:

$$\alpha = 6,03 \text{ m/kg}^{1/2}. \quad (6)$$

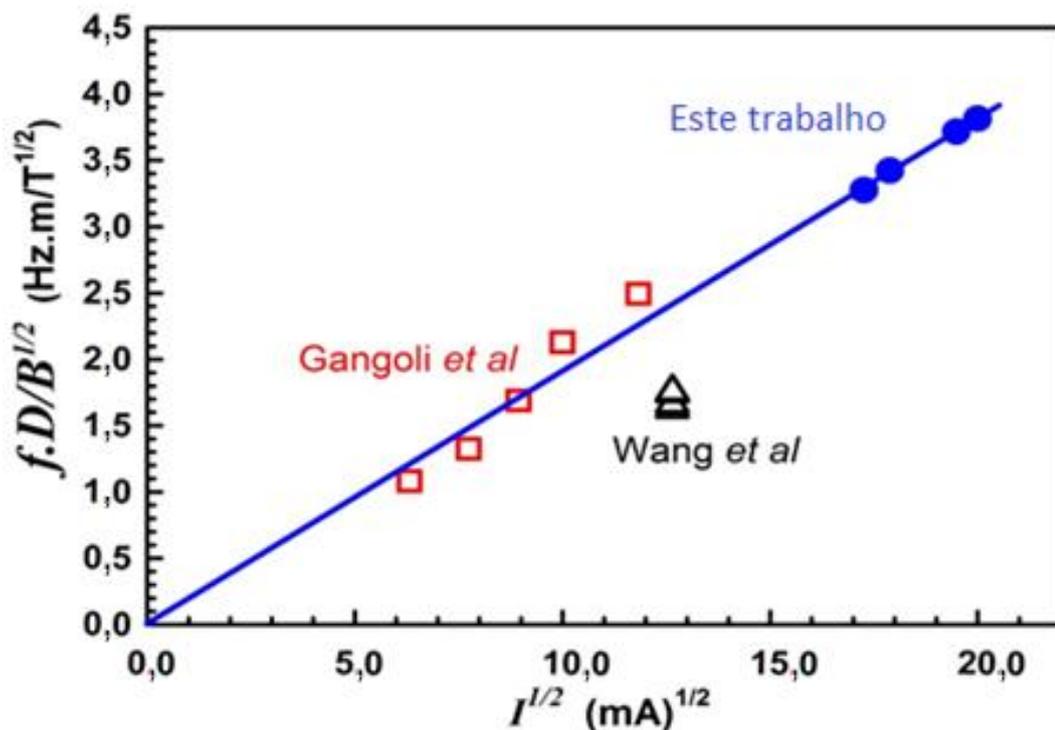


Figura 54 –  $f D / B^{1/2}$  em função de  $I^{1/2}$  para três MGAs diferentes.

É interessante observar que os dados de Gangoli *et al* (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a), na média, se ajustam aos resultados do presente trabalho, embora haja uma dispersão não desprezível para correntes abaixo e acima de 80 mA (equivalente a  $I^{1/2} = 9,0 \text{ (mA)}^{1/2}$ ), que ficam, respectivamente, abaixo e acima da previsão teórica dos valores aqui obtidos para  $f D / (B_r = D / 2)^{1/2}$ . Por outro lado, os resultados experimentais de Wang *et al* (WANG et al., 2018) (para a corrente de 160

mA) convergiram para uma pequena região do gráfico e ficaram 25% abaixo do valor da reta média obtida de  $f D / (B_r = D / 2)^{1/2}$  em função de  $I^{1/2}$ . Essa diferença pode ser justificada pelo tipo de gás usado por Wang, uma mistura de argônio, nitrogênio e propano, que acarreta uma densidade média dos gases, na qual o arco se desloca, maior que a deste trabalho e o de Gangoli *et al.* Deste modo o coeficiente  $\alpha_{Wang \text{ et al}}$  tende a ser menor, e assim, os dados de Wang *et al* tendem a ficar abaixo da reta obtida neste trabalho.

Com o valor de  $\alpha$  aqui obtido ( $= 6,03 \text{ m/kg}^{1/2}$ ) e os valores de  $C_d$  e  $\rho$ , pode-se determinar o diâmetro  $d$  do arco a partir da equação 5, obtendo-se:

$$d = 2 / (\pi^2 C_d \rho \alpha^2) \quad (6)$$

Como discutido nas referências (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010b; KALRA; GUTSOL; FRIDMAN, 2005), os limites para o coeficiente de arrasto  $C_d$  para um largo intervalo do número de Reynolds ( $10^2$  até  $10^5$ ) é  $1 < C_d < 1,3$ . Aqui será usado o mesmo valor sugerido por Gangoli (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010a) ou seja,  $C_d = 1,3$ , que é apropriado para um baixo número de Reynolds. Por outro lado, estimando-se a temperatura do fluido ambiente (mistura de ar e o gás de trabalho  $\text{CO}_2$ ) em volta do arco próximo ao cátodo em torno de  $320 \pm 20 \text{ K}$  (pois o cátodo é resfriado continuamente pelo fluxo do gás de trabalho). Pode-se estimar também, a densidade  $\rho$  do fluido, onde o pé do arco se desloca, na faixa entre  $1,1$  e  $1,7 \text{ kg.m}^{-3}$ . Assim, com esses valores de  $C_d$  e  $\rho$ , consegue-se estimar, com a equação 6, o diâmetro do arco na região próxima ao cátodo, que vale:

$$d = (3,2 \pm 0,7) \text{ mm.} \quad (7)$$

Este resultado é para o diâmetro do arco próximo a superfície do cátodo, que não foi observado experimentalmente devido à geometria do cátodo entalhado. Contudo, ele está entre os dois valores determinados na seção 4.4:  $d = (0,59 \pm 0,07) \text{ mm}$  para a Figura 49b e  $d = (3,9 \pm 0,2) \text{ mm}$  para as outras três figuras. Como o menor diâmetro só foi observado em uma foto entre 1000 imagens, que corresponde a uma reconexão com aumento muito grande da corrente, é de se admitir que o maior diâmetro da coluna do arco seja o maior valor. A diferença entre os dois valores é

menor que a soma das incertezas dos dois resultados, indicando uma coerência nos resultados.

Estes resultados obtidos no presente trabalho também estão próximos aos valores experimentais obtidos por Gangoli *et al* (GANGOLI; GUTSOL; FRIDMAN, 2010b) extrapolados para correntes de 300 a 400 mA.

## 6 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um novo tipo de MGA que permitiu aumentar o comprimento do arco e a estabilidade de uma descarga de arco deslizante magnético (MGA) operada no ar à pressão atmosférica, usando um cátodo cilíndrico entalhado (CCE), com CO<sub>2</sub> como gás de trabalho.

Foi observado que um canal na superfície do cátodo tende a confinar o arco dentro dele com uma estabilidade aprimorada. Isso permitiu que o **disco de plasma com cátodo cilíndrico entalhado** (MGA-CCE), desenvolvido aqui, atingisse um comprimento radial mínimo do arco de 40 mm, um diâmetro de disco de plasma de 102,0 mm, usando correntes de 300 a 400 mA. A limitação do diâmetro de 102,0 mm deve-se ao diâmetro dos ímãs comerciais encontrados.

Os valores da frequência  $f$  em função da corrente  $I$  indicam que os resultados experimentais do MGA-CCE desenvolvido forneceram  $f \propto I^{0,508 \pm 0,015}$ , o que está dentro da previsão  $f \propto I^{1/2}$ .

O comportamento geral de diferentes MGA operando no ar à pressão atmosférica pode ser comparado e representado em um único gráfico de  $f D / (B_{r=D/2})^{1/2}$  como uma função de  $I^{1/2}$ , que produz uma relação linear com o coeficiente angular  $\alpha = 6,03 \text{ m/kg}^{1/2}$ .

Foi desenvolvido um modelo matemático que permite representar em um único gráfico o comportamento de MGAs com dimensões, correntes e campos magnéticos diferentes.

Foi desenvolvido um dispositivo de baixo custo, usando LDRs, para medir a frequência de giro do arco, que funcionou de forma satisfatória, evitando o uso de câmeras de alta velocidade.

A medida do diâmetro  $d$  do arco por imagens da câmera de alta velocidade é compatível com o calculado para a região do cátodo, usando os dados de frequência de rotação do arco.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Refazer as medidas de frequência de rotação do arco com o reator fechado, para que se possa testar gases diferentes.

Colocar bobinas no lugar dos imãs, para que se possa variar o campo magnético e para determinar novos pontos, afim de melhor caracterizar o plasma.

Filmar o pé do arco dentro do entalhe no cátodo para medir seu diâmetro e comparar com o valor obtido teoricamente.

Melhorar a refrigeração do cátodo para evitar superaquecimento.

Testar o entalhe no catodo do plasma em disco tipo RGA.

## REFERÊNCIAS

ANGELES, P J P. **Estudo de tochas de plasma através da teoria da similaridade**. 2003. 1–100 f. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2003.

BO, Z et al. Plasma assisted dry methane reforming using gliding arc gas discharge: Effect of feed gases proportion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5545–5553, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.101>>.

BOULOS, M I; FAUCHAIS, P L; PFENDER, E. **Handbook of thermal plasmas**. Switzerland: Springer International, 2016.

BOULOS, M I; FAUCHAIS, P; PFENDER, E. **Thermal plasmas Fundamentals and applications Volume 1**. 1st. ed. New York: Plenum Press, 1994.

CHU, P K; LU, X. **Low temperature plasma technology: Methods and applications**. New York: CRC Press, 2014. Disponível em: <<http://www.crcpress.com>>.

CUNHA, A G. **Desenvolvimento de reator a plasma e concepção de sistema de geração elétrica com captura de carbono sólido**. Vitória (UFES): LPT-Petrobras, 2014.

CZERNICHOWSKI, A. Glidarc assisted preparation of the synthesis gas from natural and waste hydrocarbons gases. **Oil & Gas Science and Technology**, v. 56, n. 2, p. 181–198, 2001.

CZERNICHOWSKI, A'. Gliding arc: Applications to engineering and environment control. **Pure and Applied Chemistry**, v. 66, n. 6, p. 1301–1310, 1994.

CZERNICHOWSKI, A et al. Destruction et valorisation complète de L'hydrogène sulfuré H<sub>2</sub>S par des procédés plasma-chimiques. **Le Journal de Physique Colloques**, v. 51, n. C5, p. C5-65-C5-71, 1990. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00230807>>.

DU, C et al. Hydrogen production by steam-oxidative reforming of bio-ethanol assisted by Laval nozzle arc discharge. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 10, p. 8318–8329, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.166>>.

ESIBYAN, E M; LEVANT, L; ERMOLYEV, Y. **Plasma-arc equipment**. Moscow: Beekman Books, Incorporated, 1973.

FRIDMAN, A'. **Plasma chemistry**. New York: Cambridge University Press, 2008. Disponível em: <[www.cambridge.org/9780521847353](http://www.cambridge.org/9780521847353)>.

FRIDMAN, A et al. Gliding arc gas discharge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 25, n. 2, p. 211–231, 1999.

FRIDMAN, A; CHIROKOV, A; GUTSOL, A. Non-thermal atmospheric pressure discharges. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 38, n. 2, p. R1–R24, 2005.

FRIDMAN, A; KENNEDY, L. **Plasma physics and engineering**. New York and London: Taylor & Francis Routledge, 2004. Disponível em: <[www.taylorandfrancis.com](http://www.taylorandfrancis.com)>.

GANGOLI, S. **Design and preliminary characterization of the magnetically stabilized gliding arc discharge**. 2007. 1–46 f. Drexel University, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1860/1860>>.

GANGOLI, S; GUTSOL, A; FRIDMAN, A'. A non-equilibrium plasma source: Magnetically stabilized gliding arc discharge: I. Design and diagnostics. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 19, n. 065003, p. 1–7, 2010a.

GANGOLI, S; GUTSOL, A; FRIDMAN, A. A non-equilibrium plasma source: Magnetically stabilized gliding arc discharge: II. Electrical characterization. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 19, n. 065004, p. 1–6, 2010b.

GUOFENG, X; XINWEI, D. Electrical characterization of a reverse vortex gliding arc reactor in atmosphere. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 40, n. 12, p. 3458–3464, 2012.

HNATIUC, E et al. Cold plasma electrochemical reactor with rotary. **ResearchGate**, n. 1, p. 2–6, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/237256822>>.

INDARTO, A' et al. Gliding arc plasma processing of CO<sub>2</sub> conversion. **Journal of Hazardous Materials**, v. 146, n. 1–2, p. 309–15, 2007. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17223261>>.

INDARTO, A et al. Effect of additive gases on methane conversion using gliding arc

discharge. **Energy**, v. 31, n. 14, p. 2986–2995, 2006.

KALRA, C et al. Gliding arc in tornado using a reverse vortex flow. **Review of Scientific Instruments**, v. 76, n. 2, 2005.

KALRA, C; GUTSOL, A; FRIDMAN, A. Gliding arc discharges as a source of intermediate plasma for methane partial oxidation. **IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE**, v. 33, n. February, p. 32–41, 2005.

KEIDAR, M; BEILIS, I. **Plasma engineering: Applications from aerospace to bio-and nanotechnology**. London, Waltham and San Diego: Academic Press (Elsevier Inc.), 2013. Disponível em: <[www.store.elsevier.com](http://www.store.elsevier.com)>.

LEE, D H et al. Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31 II, n. 2, p. 3343–3351, 2007.

LESUEUR, H; CZERNICHOWSKI, A; CHAPELLE, J. **Dispositif de génération de plasmas basse température par formation de décharges électriques glissantes**. France: 2639172. , 1988

LIN, L et al. Characteristics of gliding arc discharge plasma. **Plasma Science and Technology**, v. 8, n. 6, p. 653–655, 2006.

LIU, J L et al. High-Efficient Conversion of CO<sub>2</sub> in AC-Pulsed Tornado Gliding Arc Plasma. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 36, n. 2, p. 437–449, 2016.

MUTAF-YARDIMCI, O et al. Thermal and nonthermal regimes of gliding arc discharge in air flow. **Journal of Applied Physics**, v. 87, n. 4, p. 1632–1641, 2000.

NUNNALLY, T. et al. Dissociation of H<sub>2</sub>S in non-equilibrium gliding arc “tornado” discharge. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 18, p. 7618–7625, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.045>>.

OMBRELLO, T et al. Enhancement of combustion and flame stabilization using stabilized non-equilibrium plasma. 2005, Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. p. 1–9.

PETITPAS, G. et al. A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 14, p. 2848–2867, 2007.

PIAVIS, W; TURN, S. An experimental investigation of reverse vortex flow plasma reforming of methane. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 22, p. 17078–17092, 2012. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.126>>.

ROTH, J R. **Industrial plasma engineering Volume 1: Principles**. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995. v. 1.

RUEANGJITT, N; SREETHAWONG, T; CHAVADEJ, S. Reforming of CO<sub>2</sub>-containing natural gas using an AC gliding Arc system: Effects of operational parameters and oxygen addition in feed. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 28, n. 1, p. 49–67, 2008.

RUSANOV, V D; FRIDMAN, A A. The physics of a chemically active plasma. **NASA/ADS**, n. Moscow, Izdatel'stvo Nauka, p. 416–424, 1984. Disponível em: <[http://adsabs.harvard.edu/adsfeedback/submit\\_abstract.php?>](http://adsabs.harvard.edu/adsfeedback/submit_abstract.php?>).

SOLOENENKO, O P. **Thermal plasma torches and Technologies**. [S.l.]: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2003. Disponível em: <<http://cisp-publishin.com>>.

TU, X; WHITEHEAD, J C. Plasma dry reforming of methane in an atmospheric pressure AC gliding arc discharge: Co-generation of syngas and carbon nanomaterials. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 18, p. 9658–9669, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.073>>.

WANG, C et al. Effect of the Magnetic Field on the Magnetically Stabilized Gliding Arc Discharge and Its Application in the Preparation of Carbon Black Nanoparticles. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 38, n. 6, p. 1223–1238, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11090-018-9915-1>>.

WU, A et al. Study of the dry methane reforming process using a rotating gliding arc reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 31, p. 17656–17670, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.036>>.

ZHANG, H et al. Plasma activation of methane for hydrogen production in a N<sub>2</sub> rotating gliding arc warm plasma: A chemical kinetics study. **Chemical Engineering Journal**, v. 345, n. March, p. 67–78, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.123>>.

ZHU, F et al. Destruction of toluene by rotating gliding arc discharge. **Fuel**, v. 176, p. 78–85, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.065>>.

ZHUKOV, M F et al. **Thermal plasma torches**. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2007. Disponível em: <<http://www.cisp-publishing.com>>.

ZUCOLOTTO, C G Jr. **Geração de hidrogênio e negro de fumo pela pirólise do gás natural utilizando uma tocha de plasma**. 2006. 1–86 f. Universidade Federal de Espírito Santo, 2006.