

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE-3M

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOCHA DE PLASMA HÍBRIDA PARA O  
PROCESSAMENTO DE MATERIAIS**

Richard Thomas Lermen

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2011

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE-3M

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOCHA DE PLASMA HÍBRIDA PARA O  
PROCESSAMENTO DE MATERIAIS**

Richard Thomas Lermen  
Físico, Me. Eng. Minas, Metalúrgica e de Materiais

Trabalho realizado no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) da Escola de Engenharia da UFRGS, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE-3M), como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Porto Alegre

2011

Esse trabalho foi julgado adequado como tese de doutorado em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE-3M

Porto Alegre

2011

“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.” (Albert Einstein)

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas, as quais presto minha sincera homenagem:

Ao Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas da Escola de Engenharia da UFRGS – LS&TC, na pessoa do Prof. Dr. Ivan Guerra Machado, pela orientação, oportunidade, apoio total e dedicação demonstrada durante o período de desenvolvimento deste trabalho, assim como pelos anos de convivência e aprendizado contínuo.

Aos colegas de Laboratório, Prof. Dr. José A. E. Mazzaferro e do Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales, do doutorando Roger N. Verástegui, aos graduandos Samyr Ismail e Diego Aires de Freitas e, principalmente, ao técnico Luis H. M. Zaniratti que, de alguma forma, colaboraram significativamente.

Aos demais amigos e amigas que também colaboraram, de alguma forma, para o bom desempenho das atividades propostas.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul por ser pública, gratuita e de qualidade, bem como a todos os professores do PPGE-3M pelo conhecimento técnico transmitido e pela profunda amizade formada.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro prestado;

E principalmente aos meus pais Marisa E. V. Lermen e Joseli A. Lermen, minhas irmãs Graciela Lermen e Jaqueline Lermen, minha companheira Camila Pereira Lisboa por toda compreensão, apoio e motivação.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XVI
LÍSTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES .....	XVII
RESUMO .....	XX
ABSTRACT .....	XXI
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>3</b>
<i>1.1.1 Objetivos Específicos.....</i>	<i>3</i>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Breve Histórico.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Descarga Elétrica em Gases – Arco Elétrico .....</b>	<b>7</b>
<i>2.2.1 Característica Elétrica do Arco .....</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Modos de Emissão de Elétrons.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3 Ignição ou “Breakdown” de um Gás .....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4 Parâmetros do Plasma e Equilíbrio Termodinâmico Local.....</i>	<i>14</i>
<b>2.3 Características e Tipos de Tochas à Plasma.....</b>	<b>18</b>
<i>2.3.1 Classificação das Tochas de Plasmas .....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.2 Jato de Plasma em Tochas de arco Não-Transferido .....</i>	<i>24</i>
<i>2.3.3 Propulsor Eletromagnético - MPDT .....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.4 Tochas Híbridas .....</i>	<i>28</i>
<b>2.4 Processos Industriais Envolvendo Plasmas .....</b>	<b>32</b>
<i>2.4.1 Soldagem e Corte Plasma .....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.2 Endurecimento Superficial .....</i>	<i>34</i>
<b>2.5 Métodos para Caracterização do Jato de Plasma.....</b>	<b>37</b>
<i>2.5.1 Análise de Sinais Elétricos .....</i>	<i>37</i>
<i>2.5.2 Distribuição de Temperatura através de câmara CCD .....</i>	<i>39</i>
<i>2.5.3 Projeto e Análise de Experimentos.....</i>	<i>42</i>
<b>3 MATERIAIS E METODOLOGIAS.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Tocha de Plasma Híbrida.....</b>	<b>44</b>
<i>3.1.1 Princípio de Funcionamento da Tocha de Plasma Híbrida.....</i>	<i>44</i>
<i>3.1.2 Estrutura da Tocha de Plasma Híbrida .....</i>	<i>45</i>
<i>3.1.3 Fontes de Potências.....</i>	<i>50</i>

3.1.4	<i>Sistema de Injeção de Gás e Líquido de Arrefecimento</i> .....	51
<b>3.2</b>	<b>Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida</b> .....	53
3.2.1	<i>Determinação das Curvas Característica – U x I</i> .....	54
3.2.2	<i>Determinação da Força Propulsora</i> .....	56
3.2.3	<i>Comprimento do Jato de Plasma</i> .....	57
3.2.4	<i>Distribuição de Temperatura do Jato de Plasma</i> .....	57
<b>3.3</b>	<b>Aplicação da Tocha de Plasma em Processos de Fabricação</b> .....	59
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	62
4.1	<b>Testes Iniciais com a Tocha</b> .....	62
4.2	<b>Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida</b> .....	65
4.2.1	<i>Força Propulsora</i> .....	65
4.2.2	<i>Comprimento do Jato de Plasma</i> .....	71
4.2.3	<i>Distribuição de Temperatura no Jato de plasma</i> .....	77
4.2.4	<i>Curvas Características – U x I</i> .....	80
4.2.5	<i>Discussão sobre a Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida</i> .....	93
4.3	<b>Aplicação em Processos de Fabricação</b> .....	94
4.3.1	<i>Soldagem</i> .....	94
4.3.2	<i>Corte Térmico</i> .....	95
4.3.3	<i>Endurecimento Superficial</i> .....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	98
<b>6</b>	<b>SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	101
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	102
	<b>ANEXO A</b> .....	108
	<b>ANEXO B</b> .....	122
	<b>ANEXO C</b> .....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Jato de plasma exaustado pelo bocal da Tocha de Plasma Híbrida desenvolvida na presente tese.....	2
<b>Figura 2.1.</b> Gráfico da tensão em função da intensidade de corrente elétrica contínua, com eletrodos paralelos, à baixa pressão – 0,1 kPa (ROTH, 1995).....	7
<b>Figura 2.2.</b> Representação esquemática das regiões de um arco linear, com a distribuição de tensão ao longo do arco (ROTH, 1995).....	9
<b>Figura 2.3.</b> Típico comportamento da temperatura das partículas do plasma (elétrons e do gás) em função da pressão (ROTH, 1995). ....	15
<b>Figura 2.4.</b> Condutividade elétrica em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).....	16
<b>Figura 2.5.</b> Condutividade térmica em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).....	17
<b>Figura 2.6.</b> Viscosidade em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986). .....	17
<b>Figura 2.7.</b> Densidade de massa em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).....	17
<b>Figura 2.8.</b> Configuração de arco: (a) indireto ou não-transferido, (b) direto ou transferido e (c) sobreposto (MARROTA, 1991, apud COUTINHO, 2007). ....	19
<b>Figura 2.9.</b> Tipos de estabilização do arco em tochas de plasma: (a) parede; (b) parede segmentada; (c) parede porosa; (d) turbulência; (e) vórtice; e (f) magnética (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007). ....	21
<b>Figura 2.10.</b> Curva característica do arco e da fonte, apresentando o ponto de estabilização elétrica (BARRETO, 1998). ....	22
<b>Figura 2.11.</b> Classificação das Tochas de Plasmas (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007). ....	23
<b>Figura 2.12.</b> (a) Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica e (b) comprimento do jato de plasma em função da vazão do gás (PAN, <i>et al.</i> , 2002). .....	25
<b>Figura 2.13.</b> Representação esquemática de um dispositivo magnetoplasmadinâmico (MPDT) (CHOUEIRI, 2004). ....	26
<b>Figura 2.14.</b> Configurações de alguns MPDTs (CLARK e JAHN, 1967). ....	28

<b>Figura 2.15.</b> Representação esquemática de uma tocha de soldagem Plasma/MIG equipada com eletrodo anular de cobre (ESSERS, <i>et al.</i> , 1981).....	29
<b>Figura 2.16.</b> Representação esquemática de uma tocha híbrida de plasma com arco não-transferido (BROWNING, 1986). .....	30
<b>Figura 2.17.</b> (a) Configuração de uma tocha de plasma com duplo anodo e (b) conexões elétricas características (TU, CHÉRON, <i>et al.</i> , 2008).....	31
<b>Figura 2.18.</b> Escala de potências específicas (LANCASTER, 1986). .....	32
<b>Figura 2.19.</b> Processo de soldagem por Plasma: (a) equipamentos e (b) região ampliada de onde ocorre a soldagem por “keyholing” (KOU, 2002).....	33
<b>Figura 2.20.</b> Comparação dos arcos elétricos formados nos processos PAW e TIG (AWS, 1991).....	34
<b>Figura 2.21.</b> Desenho esquemático do processo de têmpera por jato de plasma não-transferido (PAN, MENG, <i>et al.</i> , 2005).....	36
<b>Figura 2.22.</b> Gráfico da tensão em função do tempo apresentando os modos básicos de operação de um arco plasma não-transferido. (WUA e PAN, 2011). .....	38
<b>Figura 2.23.</b> Emitância espectral (intensidade de radiação hemisférica) de um corpo negro para quatro temperaturas (SEGOVIA, <i>et al.</i> , 1998). .....	40
<b>Figura 3.1.</b> Desenho esquemático da tocha de plasma híbrida.....	45
<b>Figura 3.2.</b> Desenho esquemático inicial da tocha de plasma híbrida desenvolvida no LS&TC. ....	46
<b>Figura 3.3.</b> (a) Peças constituintes da tocha de plasma híbrida e (b) a mesma montada.....	46
<b>Figura 3.4.</b> Tocha de plasma híbrida modificada. ....	47
<b>Figura 3.5.</b> Vista explodida da tocha de plasma híbrida modificada.....	48
<b>Figura 3.6.</b> Fontes de energia utilizadas para o acionamento da tocha de plasma híbrida, (a) fonte secundária e (b) fonte primária.....	51
<b>Figura 3.7.</b> Secção transversal da tocha híbrida geradora de plasma com a representação esquemática dos fluxos de gás e líquido refrigerante. ....	52
<b>Figura 3.8.</b> Aparato experimental para caracterização da Tocha de Plasma Híbrida.....	53
<b>Figura 3.9.</b> Sensores para medir a intensidade de corrente elétrica com gráfico de calibração dos mesmos (tensão no shunt em mV e tensão no Sensor Hall em V).....	55
<b>Figura 3.10.</b> (a) Circuito elétrico do divisor de tensão e (b) sua respectiva curva de calibração.....	55

<b>Figura 3.11.</b> Desenho esquemático do aparato experimental desenvolvido para medir a força propulsora fornecida pela tocha de plasma.....	57
<b>Figura 3.12.</b> Processamento de imagens utilizado para determinar a distribuição de temperatura. (a) Imagem coletada pela câmara CCD, (b) imagem processada, (c) matriz de elementos com níveis de cinza e (d) imagem final com nível de cinza correspondente a temperatura.....	58
<b>Figura 3.13.</b> Distribuição de temperatura para um arco elétrico TIG.....	59
<b>Figura 3.14.</b> (a) Bancada utilizada nos testes de soldagem, corte e endurecimento superficial. (b) Tocha funcionando em um dos testes de soldagem.....	60
<b>Figura 4.1.</b> Tocha de plasma híbrida funcionando com apenas o arco elétrico primário.....	63
<b>Figura 4.2.</b> Eletrodos danificados pela erosão. (a) (b) Catodos primários, (c) anodo primário e (d) (e) (f) anodos secundários.....	64
<b>Figura 4.3.</b> Componentes da tocha híbrida danificados por descargas elétricas. (a) flange isolante, (b) (h) bocais cerâmicos, (c) parafusos, (d) (g) buchas isolantes, (e) pinça e (f) difusor.....	65
<b>Figura 4.4.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A.....	67
<b>Figura 4.5.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A.....	67
<b>Figura 4.6.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50A.....	68
<b>Figura 4.7.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A.....	68
<b>Figura 4.8.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.....	69
<b>Figura 4.9.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A.....	69
<b>Figura 4.10.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.....	70
<b>Figura 4.11.</b> Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.....	70
<b>Figura 4.12.</b> (a) Padrão de distância para determinar o comprimento do jato de plasma. Jatos de plasma expulso para fora da câmara, com indicação dos respectivos comprimentos, para	

intensidades de corrente elétrica, primária de 30 A e secundária de 200 A, e vazões do gás de (b) 7 l/min, (c) 14 l/min, (d) 20 l/min e (e) 25 l/min. ....	71
<b>Figura 4.13.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A. ....	73
<b>Figura 4.14.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A. ....	73
<b>Figura 4.15.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A. ....	74
<b>Figura 4.16.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A. ....	74
<b>Figura 4.17.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A. ....	75
<b>Figura 4.18.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A. ....	75
<b>Figura 4.19.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A. ....	76
<b>Figura 4.20.</b> Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A. ....	76
<b>Figura 4.21.</b> Distribuição de temperatura nos jatos de plasma gerados somente pela fonte de potência secundária. Experimentos realizados com diferentes intensidades de corrente elétrica secundária e vazões do gás (valores indicados acima dos perfis). ....	77
<b>Figura 4.22.</b> Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 30 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis). ....	78

<b>Figura 4.23.</b> Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 40 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis) .....	79
<b>Figura 4.24.</b> Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 50 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis) .....	79
<b>Figura 4.25.</b> Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 60 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis). .....	80
<b>Figura 4.26.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A. ....	82
<b>Figura 4.27.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A. ....	83
<b>Figura 4.28.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A. ....	83
<b>Figura 4.29.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A. ....	84
<b>Figura 4.30.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A. ....	84
<b>Figura 4.31.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A. ....	85
<b>Figura 4.32.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A. ....	85
<b>Figura 4.33.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A. ....	86
<b>Figura 4.34.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A. ....	86
<b>Figura 4.35.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A. ....	87

<b>Figura 4.36.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.....	87
<b>Figura 4.37.</b> Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.....	88
<b>Figura 4.38.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.....	88
<b>Figura 4.39.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A.....	89
<b>Figura 4.40.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.....	89
<b>Figura 4.41.</b> Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.....	90
<b>Figura 4.42.</b> Sinais de (a) corrente primária – $I_p$ e (b) tensão primária – $U_p$ para uma vazão de argônio de 20 l/min.....	90
<b>Figura 4.43.</b> Sinais de (a) corrente secundária – $I_s$ e (b) tensão secundária – $U_s$ para uma vazão de argônio de 20 l/min.....	91
<b>Figura 4.44.</b> Resultados da rápida transformada de Fourier para as tensões nos arcos elétricos, primário ( $U_p$ ) e secundário ( $U_s$ ), para diferentes vazões do gás. $I_p = 40$ A e $I_s = 250$ A. (a) (d) Intervalo de frequência de 0 à 5000 Hz, (b) (e) intervalo de frequência de 175 à 185 Hz e (c) (f) intervalo de frequência de 358 à 364.....	92
<b>Figura 4.45.</b> Vista superior das chapas de aço submetidas à soldagem.....	95
<b>Figura 4.46.</b> Vista lateral do corte de uma chapa de aço realizado com a tocha de plasma híbrida.....	96
<b>Figura 4.47.</b> Gráfico da microdureza em relação à distância da superfície de incidência do jato de plasma e macrografia da secção transversal da região tratada termicamente.....	97
<b>Figura A.1.</b> Parafuso.....	108
<b>Figura A.2.</b> Bucha isolante.....	108
<b>Figura A.3.</b> Capa longa.....	108
<b>Figura A.4.</b> Corpo fixador.....	109
<b>Figura A.5.</b> Pinça.....	109
<b>Figura A.6.</b> Catodo secundário.....	109
<b>Figura A.7.</b> Anodo primário.....	109
<b>Figura A.8.</b> Anodo secundário.....	110

<b>Figura A.9.</b> Bocal cerâmico.....	110
<b>Figura A.10.</b> Bolacha isolante.....	110
<b>Figura A.11.</b> Bucha cerâmica.....	110
<b>Figura A.12.</b> Câmara de refrigeração catodo primário.....	111
<b>Figura A.13.</b> Catodo primário.....	111
<b>Figura A.14.</b> Bucha fixadora do bocal cerâmico.....	111
<b>Figura A.15.</b> Difusor fixador para o catodo secundário.....	111
<b>Figura A.16.</b> Difusor de gás.....	112
<b>Figura A.17.</b> Flange fixador para a câmara de refrigeração do catodo secundário.....	112
<b>Figura A.18.</b> Flange fixador (23).....	112
<b>Figura A.19.</b> Flange fixador com entrada de gás, com conector de energia e com conexão para câmara de refrigeração do catodo primário.....	113
<b>Figura A.20.</b> Flange fixador anodo primário.....	113
<b>Figura A.21.</b> Flange fixador para câmara de refrigeração do anodo primário.....	114
<b>Figura A.22.</b> Flange fixador para a câmara de refrigeração do anodo secundário.....	114
<b>Figura A.23.</b> Flange isolante utilizado para o isolamento elétrico entre os catodos, secundário e primário.....	114
<b>Figura A.24.</b> Flange isolante utilizado para isolamento elétrico entre o catodo primário e anodo primário.....	115
<b>Figura A.25.</b> Flange isolante utilizado para isolamento elétrico entre os anodos, primário e secundário.....	115
<b>Figura A.26.</b> Peça I da câmara de refrigeração para o catodo secundário.....	115
<b>Figura A.27.</b> Peça II da câmara de refrigeração para o catodo secundário.....	116
<b>Figura A.28.</b> Peça I da câmara de refrigeração para o anodo primário.....	116
<b>Figura A.29.</b> Parte II da câmara de refrigeração para o anodo primário.....	116
<b>Figura A.30.</b> Parte I da câmara de refrigeração para o anodo secundário.....	117
<b>Figura A.31.</b> Parte II da câmara de refrigeração para o anodo secundário.....	117
<b>Figura A.32.</b> Conjunto I de peças montadas da tocha de plasma.....	118
<b>Figura A.33.</b> Conjunto II de peças montadas da tocha de plasma.....	118
<b>Figura A.34.</b> Conjunto III de peças montadas da tocha de plasma.....	119
<b>Figura A.35.</b> Conjunto IV de peças montadas da tocha de plasma.....	119
<b>Figura A.36.</b> Tocha de Plasma Híbrida montada.....	121
<b>Figura C.1.</b> Painel frontal de controle utilizado para aquisição de dados.....	127

<b>Figura C.2.</b> Diagrama de blocos em Labview para aquisição de dados.....	127
<b>Figura C.3.</b> Diagrama de blocos para leitura e processamento de dados. ....	128
<b>Figura C.4.</b> Painel frontal de controle para leitura e processamento de dados. ....	129

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Alguns parâmetros de plasmas gerados por descargas elétricas em modo de arco não-térmico e térmico (ROTH, 1995). .....	15
<b>Tabela 3.1.</b> Variáveis (parâmetros) com respectivos níveis para os experimentos realizados na caracterização da Tocha de Plasma Híbrida .....	54
<b>Tabela 3.2.</b> Composição química do aço AISI 52100. ....	61
<b>Tabela 4.1.</b> Análise de variância (Fatorial ANOVA) para força propulsora. ....	66
<b>Tabela 4.2.</b> Análise de variância (Fatorial ANOVA) para o comprimento do jato de plasma. ....	72
<b>Tabela 4.3.</b> Análise de variância (Fatorial – ANOVA) para a tensão elétrica – RMS entre os eletrodos primários. ....	81
<b>Tabela 4.4.</b> Análise de variância (Fatorial – ANOVA) para a tensão elétrica – RMS entre os eletrodos secundários.....	81
<b>Tabela 4.5.</b> Experimentos realizados com respectivos parâmetros de soldagem. ....	95
<b>Tabela B.1.</b> Matriz experimental com resultados obtidos na caracterização da tocha de plasma híbrida.....	122

## LÍSTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A/D – Analógico/Digital.

ANOVA – Análise de Variância (“Analysis of Variance”).

AWS – “American Welding Society”.

CC – Corrente Contínua.

CCD – “Charged Coupled Device”.

d.d.p. – diferença de potência elétrica ou queda de tensão.

ETL – Equilíbrio Termodinâmico Local.

FFT – Transformada Rápida de Fourier (“Fast Fourier Transform”).

FSW – “Friction Stir Welding”.

GMAW – “Gas Metal Arc Welding”.

GTAW – “Gas Tungsten Arc Welding”.

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

LASER – “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”.

LS&TC – Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas.

MAG – “Metal Active Gas”.

MIG – “Metal Inert Gas”.

MPDT – “Magnetoplasmadynamic Thruster”.

MSR – Metodologia da Superfície de Resposta.

PAW – “Plasma Arc Welding”.

PPT – “Pulsed Plasma Thruster”.

RF – Rádio Frequência.

RMS – Média Quadrática (“Root Mean Square”).

TIG – “Tungsten Inert Gas”.

UV – Ultravioleta.

ZAC – Zona Afetada pelo Calor.

$\dot{m}$  – Taxa do fluxo de gás (vazão do gás) – (l/min).

$a_0$  – Velocidade acústica do íon (m/s).

$B$  – Densidade de campo magnético induzido ( $T/m^2$ ).

$B_P$  – Densidade de campo magnético induzido primário ( $T/m^2$ )

$B_S$  – Densidade de campo magnético induzido secundário ( $T/m^2$ )

$c$  – Calor específico (J/Kg.K).

$C_p$  – Calor específico a pressão constante (J/Kg.K).  
 $d$  – Distância entre eletrodos (m).  
 $E$  – Campo elétrico (N/C).  
 $e$  – Carga do elétron (C)  
 $F$  – Vetor força eletromagnética por unidade de volume (N/m<sup>3</sup>).  
 $F_P$  – Vetor Força eletromagnética primária por unidade de volume (N/m<sup>3</sup>).  
 $F_S$  – Vetor Força eletromagnética secundária por unidade de volume (N/m<sup>3</sup>).  
 $F_{Te}$  – Força de propulsão eletrotérmica (N).  
 $F_T$  – Força propulsora (N).  
 $F_z$  – Força na direção axial do jato de plasma (N).  
 $I$  – Intensidade de corrente elétrica (A).  
 $I_S$  – Intensidade de corrente elétrica secundária (A).  
 $I_P$  – Intensidade de corrente elétrica primária (A).  
 $j$  – Densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>).  
 $J$  – Densidade de corrente elétrica total (A/m<sup>2</sup>).  
 $J_P$  – Densidade de corrente primária (A/m<sup>2</sup>).  
 $J_S$  – Densidade de corrente secundária (A/m<sup>2</sup>).  
 $K$  – Constante de Boltzmann (  $1,38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg/s}^2 \cdot \text{K}$ )  
 $n_e$  – Densidade eletrônica (elétrons/m<sup>3</sup>).  
 $p$  – Pressão do gás (Pa).  
 $q$  – Vetor fluxo de calor (W/m<sup>2</sup>).  
 $r_a$  – Raio do anodo (m).  
 $r_c$  – Raio do catodo (m).  
 $T$  – Temperatura absoluta do gás (K).  
 $t$  – Tempo (s).  
 $T_e$  – Temperatura eletrônica (eV)  
 $T_g$  – Temperatura do gás – iônica (eV)  
 $U$  – Tensão elétrica (V)  
 $U_P$  – Tensão elétrica primária (V)  
 $U_S$  – Tensão elétrica secundária (V)  
 $u$  – Velocidade do fluxo de gás dentro da câmara do acelerador (m/s).  
 $V_I$  – Primeiro potencial de ionização (V).  
 $V_r$  – Tensão de ruptura do gás (V).

$\alpha$  - Grau de ionização.

$\sigma_e$  – Condutividade elétrica do gás (A/V.m).

$\rho$  – Densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>).

$\phi$  – Função-trabalho termiônica de materiais (J).

$\mu$  – Permeabilidade magnética do meio (T.m/A).

$\gamma$  – Relação do calor específico.

$\lambda_{de}$  – Comprimento eletrônico de Debye ( $\mu\text{m}$ ).

$\lambda$  – Comprimento de onda (nm).

$\eta$  – Viscosidade do gás (kg/m.s).

$\nu$  – Frequência (Hz).

$\varepsilon$  – Emissividade.

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar o projeto, o desenvolvimento, a caracterização e a aplicação de um novo dispositivo híbrido gerador de plasma. Este dispositivo consiste em uma tocha de plasma híbrida, a qual é caracterizada pela formação simultânea de dois arcos plasmas, em apenas um dispositivo, que geram um jato de plasma com elevada densidade de energia. Esta tocha é proveniente da união de dois processos geradores de plasma: Plasma Não-Transferido e Propulsor Magnetoplasmadinâmico.

A tocha de plasma híbrida desenvolvida no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas foi submetida aos seguintes testes: testes iniciais de funcionamento para verificar possíveis problemas de projeto e limites de operação da tocha; testes experimentais para caracterização da tocha de plasma híbrida, os quais consistiram em determinar as curvas características de tensão e corrente, o comprimento do jato de plasma, a distribuição de temperatura do jato de plasma expulso para fora da câmara, e a força propulsora resultante do jato de plasma; e testes de aplicação da tocha de plasma híbrida em processos de fabricação, tais como soldagem, corte e endurecimento superficial. Com base nos resultados obtidos para os testes de funcionamento do dispositivo, alguns problemas de isolamento elétrico e térmico foram encontrados e resolvidos. Quanto aos resultados dos testes de caracterização, os parâmetros de funcionamento da tocha de plasma híbrida apresentaram influência significativa sobre as curvas características de tensão e corrente, os comprimentos do jato de plasma, as forças propulsoras resultantes e as distribuições de temperatura. Os resultados obtidos nos testes de aplicação do dispositivo em processos de fabricação foram satisfatórios, isto é, foi possível realizar soldagens, cortes e endurecimento superficial com a tocha de plasma híbrida.

Contudo, um novo dispositivo gerador de plasma foi desenvolvido para aplicações em processos de fabricação, porém novos estudos devem ser realizados para encontrar melhores parâmetros e assim conseguir soldagem, corte e endurecimento superficial com excelentes qualidades.

**Palavras-Chave:** Tocha de Plasma Híbrida; Caracterização do Jato de Plasma; Soldagem, Corte, Endurecimento Superficial.

## ABSTRACT

The main objective of this work was to present the project, development, characterization and application to a new hybrid plasma generator device. This device consists of a hybrid plasma torch that is characterized by the simultaneous formation of two plasma arcs in only one device, generating a plasma jet with high energy density. This torch arises from the union of two different plasma processes: Plasma Non-transferred and Magnetoplasmadynamic Thruster.

The hybrid plasma torch developed in the Welding & Related Techniques Laboratory was submitted to the following trials: trials of operation to identify possible design problems and operations torch limits; trials to characterization of hybrid plasma torch that determined the characteristics curves of voltage and current, the length, the temperature distribution, and the thruster of the plasma jet; and application trials of hybrid plasma torch in manufacturing process, such as welding, cutting and hardening surface. Based at initial operation trials results with the device, some electrical and thermal insulation problems were found and solved. Concerning the results of the characterization trials, the hybrid plasma torch parameters had a significant influence over the voltage and current curves, the lengths of the plasma jet, the resultant thrusters and the temperature distributions. The results obtained in manufacturing process application trials were satisfactory, i.e. was possible to carry out welding, cutting and hardening surface with the hybrid plasma torch.

However, a new plasma generated device was developed for application in manufacturing processes, but further studies should be performed to find the best parameters to acquire excellent qualities of welding, cutting and hardening surface.

**Keywords:** Hybrid Plasma Torch; Plasma Jet Characterization; Welding; Cutting; Hardening Surface.

# 1 INTRODUÇÃO

Primeiramente convém informar que o dispositivo desenvolvido no presente trabalho foi submetido, no dia 15 de agosto de 2011, a um depósito de pedido de patente, intitulado como “Tocha Híbrida Geradora de Plasma para Aplicações em Processos de Fabricação, e, Processo de Produção de Tocha”, através do protocolo de número 000022110706782. Portanto, este trabalho possui algumas informações classificadas como sigilosas em termos de propriedade intelectual, que não podem ser divulgadas conforme a Lei de Inovação (Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004).

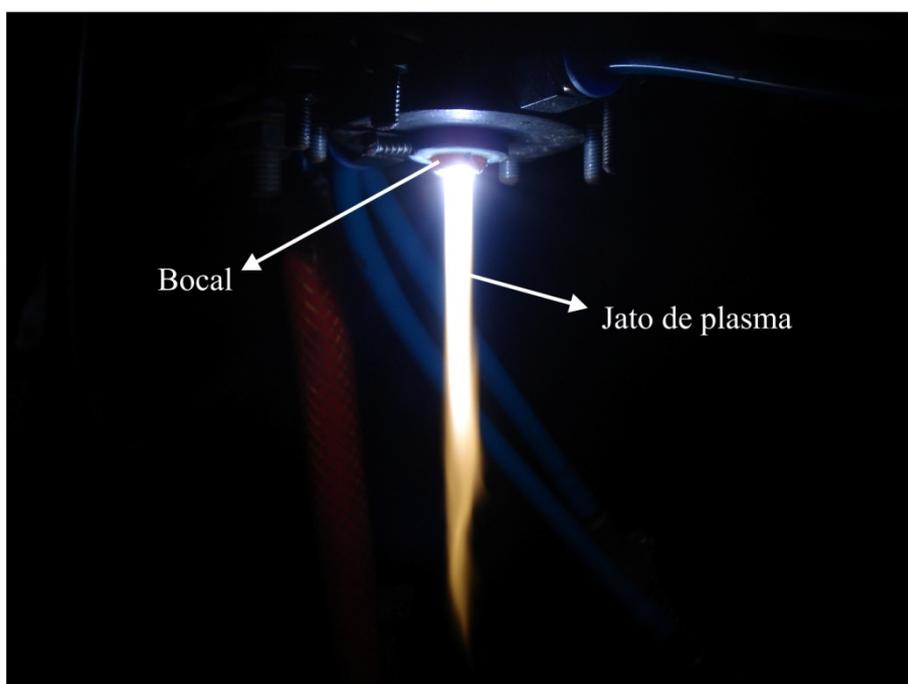
O desenvolvimento da ciência do plasma permitiu grandes avanços tecnológicos nas áreas de engenharia, física, química e outras. Os plasmas desenvolvidos para aplicações industriais podem ser utilizados na fabricação de semicondutores, sintetização de materiais, soldagem, corte térmico, iluminação, polimerização, revestimentos anticorrosivos por aspersão térmica (plasma “spray”), endurecimento superficial, produção de aços e ligas especiais, “etching” para fabricação de dispositivos eletrônicos, ativação de processos químicos, secadores industriais, queima de lixo, reciclagem de metais, separação de isótopos, motores iônicos, comunicação usando plasmas geofísicos, produção de materiais biocompatíveis para aplicações médicas e farmacêuticas, entre outras (ROTH, 1995)

Entre estas aplicações está o desenvolvimento dos propulsores elétricos, os quais são classificados em propulsores eletrotérmicos, propulsores eletrostáticos e propulsores eletromagnéticos. Os propulsores eletrotérmicos como “resistojets” e “arcjets” caracterizam-se pelo fato do gás injetado ser aquecido eletricamente e expandido através de uma câmara. Os propulsores eletrostáticos como os propulsores iônicos (“Ion Thrusters”) são aqueles em que o gás injetado é acelerado ionizando as partículas pela direta aplicação do campo elétrico. O propulsor magnetoplasmadinâmico (“Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT”), o propulsor de plasma pulsado (“Pulsed Plasma Thruster – PPT”) e o propulsor de efeito Hall (“Hall Effect Thruster”) são dispositivos classificados como propulsores eletromagnéticos, onde o fluxo de gás ionizado é acelerado, principalmente, pela interação do campo magnético interno e/ou externo com a corrente elétrica dirigida através desse fluxo (JAHN, 1968; CAP, 1976; BITTENCOURT, 1986).

O emprego de plasmas térmicos gerados por meio de tochas específicas (“tochas de plasma”) teve suas primeiras aplicações tecnológicas na década de 60. Nos últimos anos, essa tecnologia tem-se caracterizado como um dos processos eletrotérmicos industriais mais

promissores, pois apresenta uma gama de aplicações e pode ser considerado um dos processos menos poluente (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

As principais tochas de plasmas, também conhecidas como “*Plasmatrons*”, são equipamentos que transformam a energia elétrica, obtida através de uma descarga, em energia térmica – preferencialmente por efeito Joule, para aquecer rapidamente um fluxo de gás contínuo. Em casos onde campos magnéticos intensos são aplicados, parte da energia elétrica é usada para acelerar as partículas do plasma, e devido à estagnação esta energia cinética pode ser convertida em energia térmica. A descarga elétrica ocorre entre o anodo e o catodo, onde o fluxo de gás que passa através desta seção transversal é aquecido e expande-se através de um pequeno orifício, ou bocal, com altas velocidades, formando o jato de plasma (BARRETO, 1998). A **Figura 1.1** apresenta um jato de plasma exaustado pelo bocal da tocha de plasma híbrida desenvolvida no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas – LS&TC.



**Figura 1.1.** Jato de plasma exaustado pelo bocal da Tocha de Plasma Híbrida desenvolvida na presente tese.

As tochas híbridas (Plasma/MIG, LASER/MIG, LASER/TIG, Duplo Anodo, etc.) surgiram com o intuito de desenvolver processos mais produtivos e com características diferentes dos processos convencionais (TIG, MIG/MAG, LASER, etc.). Estes modernos dispositivos apresentam as seguintes vantagens sobre os dispositivos convencionais: aumento

da velocidade de soldagem e estabilidade do arco para o processo Plasma/MIG; redução do desgaste da ferramenta para o processo LASER/FSW; diminuição das zonas afetadas pelo calor (ZAC) e distorções residuais para o processo LASER/MIG; entre outras. (EL RAYES, WALZ e SEPOLD, 2004; MESSLER, 2004)

Embora a ciência do plasma possua inúmeras aplicações, as principais para o desenvolvimento desta tese, estão diretamente relacionadas com os conceitos fundamentais dos propulsores eletromagnéticos e das tochas de arco plasma (convencionais e híbridas).

## **1.1 Objetivo Geral**

Apresentar o projeto, a construção e a caracterização de uma tocha de plasma híbrida desenvolvida para aplicação em processos de fabricação, tais como: soldagem, corte térmico e endurecimento superficial.

### *1.1.1 Objetivos Específicos*

Para que o objetivo geral do trabalho seja atingido, os seguintes objetivos específicos devem ser traçados:

- i. Apresentar os componentes constituintes da Tocha de Plasma Híbrida e o modo de funcionamento da mesma;
- ii. Determinar e analisar as curvas características de descarga elétrica, tensão ( $U$ ) versus intensidade de corrente elétrica ( $I$ ), entre os eletrodos;
- iii. Caracterizar o jato de plasma quanto ao comprimento do mesmo exaustado para fora da câmara;
- iv. Estimar a distribuição de temperatura no jato de plasma expulso para fora da câmara através da técnica de emissão de radiação;
- v. Determinar a força propulsora resultante gerada pelo jato de plasma expulso para fora da câmara da tocha de plasma híbrida;
- vi. Aplicar a Tocha de Plasma Híbrida em processos de fabricação, tais como: soldagem autógena, corte térmico e endurecimento superficial.

## 1.2 Justificativa

A principal meta do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – LS&TC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS é promover o desenvolvimento de tecnologias através de iniciativas inovadoras, sendo que, atualmente, uma das áreas de pesquisa é o desenvolvimento de novos dispositivos geradores de plasma para aplicação em processos de fabricação (soldagem, corte térmico, etc.). Neste contexto, recentemente, um dispositivo MPDT foi desenvolvido e modificado com o intuito de realizar soldagem e corte de materiais metálicos. Apesar de certo desenvolvimento e algumas aplicações práticas em propulsão espacial iniciadas na década de 60 e estudadas com maior profundidade nos anos 1980, 1990 e 2000, o dispositivo MPDT vem figurar como processo de soldagem e corte a partir de 2004, porém, este dispositivo ainda não apresentou soldagens e cortes com qualidades comparáveis aos processos convencionais (TIG, MIG/MAG, etc.); e conseqüentemente não se tornou industrialmente competitivo (MACHADO e LERMEN, 2008). Também, ainda não existem informações suficientes disponíveis a respeito da potencialidade do processo quando aliado aos outros processos de soldagem e tecnologias de fontes de potência. Entretanto, um novo dispositivo híbrido gerador de plasma foi desenvolvido, o qual envolve o processo MPDT e o processo plasma não-transferido.

Para este novo dispositivo (tocha de plasma híbrida), os conhecimentos científicos relacionados com as características do jato de plasma (curvas características de tensão e corrente, comprimento do jato de plasma, força propulsora resultante, distribuição de temperatura, etc.) e a aplicação em processos de fabricação (soldagem, corte, endurecimento superficial, etc.) ainda não foram relatados nem de forma superficial, sendo os resultados encontrados fundamentais para o desenvolvimento científico-tecnológico.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Para chegar a um resultado satisfatório, faz-se necessário a revisão de alguns conceitos fundamentais como: arco elétrico, tochas de plasma, propulsores eletromagnéticos (MPDT), processos industriais envolvendo plasma (soldagem, corte térmico e endurecimento superficial) – de técnicas para a caracterização do jato de plasma (dimensionamento geométrico do jato de plasma, caracterização da tensão versus corrente, análise da distribuição de temperatura por emissão de radiação, etc.) – e de, um breve histórico destas tecnologias.

### 2.1 Breve Histórico

A palavra plasma é de origem grega, “πλάσμα”, que significa alguma coisa que pode ser formada ou moldada. Os estudos nesta área iniciaram-se em princípios do século XIX, com pesquisas em descargas elétricas de corrente contínua, por Sir Humphry Davy, em 1808, Michael Faraday e outros, em 1830. Os plasmas foram identificados como o quarto estado da matéria em 1879 por Sir William Crookes. Considerando as mudanças de estado que ocorrem através do aquecimento da matéria tem-se a passagem do estado sólido para o líquido pela fusão e deste para o gasoso pela vaporização. Adicionando-se mais energia, as partículas carregadas dos átomos tendem a se separar em elétrons e íons, formando assim, o quarto estado da matéria – o plasma. Assim tem-se uma analogia ao antigo conceito grego dos quatro elementos – terra, água, ar e fogo (NICHOLSON, 1983; CHEN, 1984; ROTH, 1995; MACHADO, 1996).

O termo plasma foi utilizado pela primeira vez por L. Tonks e I. Langmuir em 1928, para descrever a região interna de uma descarga elétrica. Hoje, acredita-se que mais de 99% do universo encontra-se no estado de plasma (NICHOLSON, 1983; CHEN, 1984; MACHADO, 1996).

O estudo e o desenvolvimento dos processos de soldagem e corte, e também dos propulsores elétricos são contemporâneos, ou seja, ambos desenvolveram-se no final do século XIX e realmente ganharam um impulso a partir dos anos 60, em virtude dos grandes avanços tecnológicos decorrentes, principalmente, das pesquisas aeroespaciais, onde os desafios quanto ao desempenho de materiais e sistema cresciam na mesma medida da chamada “guerra fria” (JAHN, 1968; MACHADO, 1996; CHOUERI, 2004).

Russel Meredith e V.H. Pauleka (E.U.A.), em 1941, desenvolveram o processo TIG, então chamado de “Heliarc”, pois utilizava o hélio como gás de proteção. O processo de soldagem arco plasma (Plasma Arc Welding – PAW) foi desenvolvido por Robert M. Gage em 1957. Também, neste mesmo período foi desenvolvido o processo de corte plasma (MACHADO, 1996)

Por volta de 1906, por Robert H. Goddard, surge a ideia de aplicações dos conceitos físicos em propulsão elétrica. Em 1911, o russo Konstantin Tsiolkovskiy propõe uma ideia de aplicação conceitual semelhante, a qual refere-se ao uso da eletricidade para acelerar partículas em um dispositivo para foguetes. Posteriormente, o professor alemão, Hermann J. Oberth, em 1929, publicou um capítulo falando de propulsão elétrica no seu famoso livro sobre viagens espaciais (“Wege zur Raumschiffahrt” – Métodos para viajar no espaço). Mas, a primeira sistematização dos conceitos físicos relacionados com propulsores elétricos pode ser atribuída à Ernst Stuhlinger, nos anos de 1950, através da publicação do livro “*Ion Propulsion for Space Flight*” (JAHN, 1968; JAHN e CHOUEIRI, 2002; CHOUEIRI, 2004).

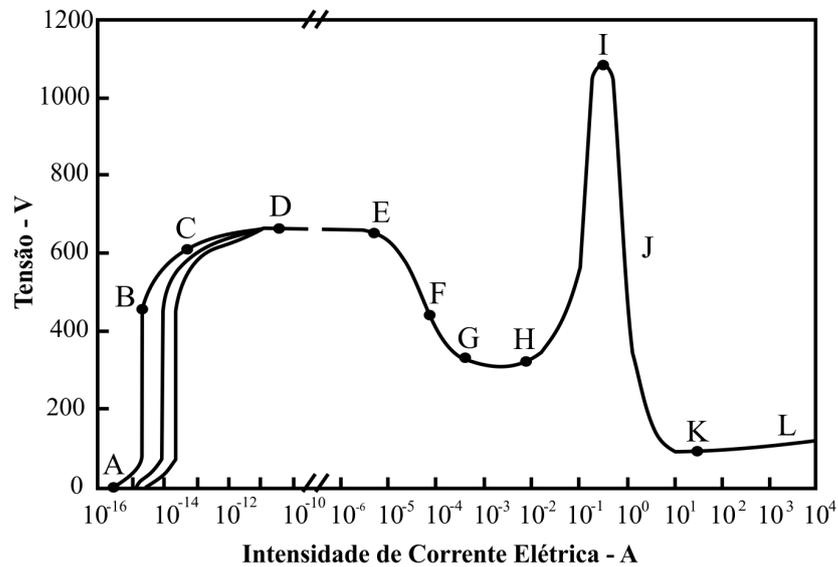
Durante a corrida espacial dos anos de 1960, em busca de novos descobrimentos, a pesquisa em relação aos propulsores elétricos sofreu um grande avanço tecnológico. Mas, é nos anos de 1980, 1990 e 2000 que os propulsores eletromagnéticos (MPDT), por serem os mais complexos, são estudados com maior profundidade e também passam a ser comercialmente utilizados (JAHN e CHOUEIRI, 2002; CHOUEIRI, 2004).

Também, novos dispositivos para aplicação industrial envolvendo plasma, principalmente em soldagem híbrida, foram e estão sendo desenvolvidos desde os anos de 1970. Esta ideia de utilizar, simultaneamente, dois ou mais processos de soldagem pode ser apresentada através da seguinte cronologia: 1972 – União do processo PAW (“Plasma Arc Welding”) com MIG (“Metal Inert Gas”)/MAG (“Metal Active Gas”), ou também conhecida como GMAW (“Gas Metal Arc Welding”); 1978 – Soldagem com dois feixes de elétrons atuando simultaneamente; 1979 – Soldagem LASER com soldagem TIG (“Tungsten Inert Gas”), também conhecida como GTAW (“Gas Tungsten Arc Welding”); 1987 – Soldagem com dois feixes LASERs atuando simultaneamente; 1991 – Soldagem LASER com soldagem MIG/MAG; 1998 – Soldagem LASER com Soldagem Plasma (PAW); 2001 – Soldagem LASER CO<sub>2</sub> de baixa potência com TIG; 2002 – Soldagem LASER com FSW (“Friction Stir Welding”) (MESSLER, 2004; OLIVEIRA, 2006).

## 2.2 Descarga Elétrica em Gases – Arco Elétrico

Desde o século passado, a descarga elétrica em gases (arco elétrico) vem sendo aplicada industrialmente como condutor elétrico, fonte de luz, e no processamento de materiais, tornando-se assim um dos fenômenos mais importantes da física de plasma. Segundo A. Guile este fenômeno é definido como “*uma descarga de eletricidade entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado a partir dos eletrodos) que tem uma queda de tensão (d.d.p.) junto ao catodo da ordem do potencial de excitação do vapor do eletrodo (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um valor mínimo que é de cerca de 100 mA*” (LANCASTER, 1986). O arco elétrico é um dos tipos de descarga elétrica que apresenta altas densidades de corrente elétrica, temperatura e condutividade elétrica, e é o tipo de descarga elétrica, geralmente, utilizado em tochas de plasmas.

Um esquema da curva característica de tensão em função da intensidade de corrente elétrica para uma descarga elétrica de corrente contínua – CC entre eletrodos paralelos à baixa pressão é apresentado pela **Figura 2.1**.



**Figura 2.1.** Gráfico da tensão em função da intensidade de corrente elétrica contínua, com eletrodos paralelos, à baixa pressão – 0,1 kPa (ROTH, 1995).

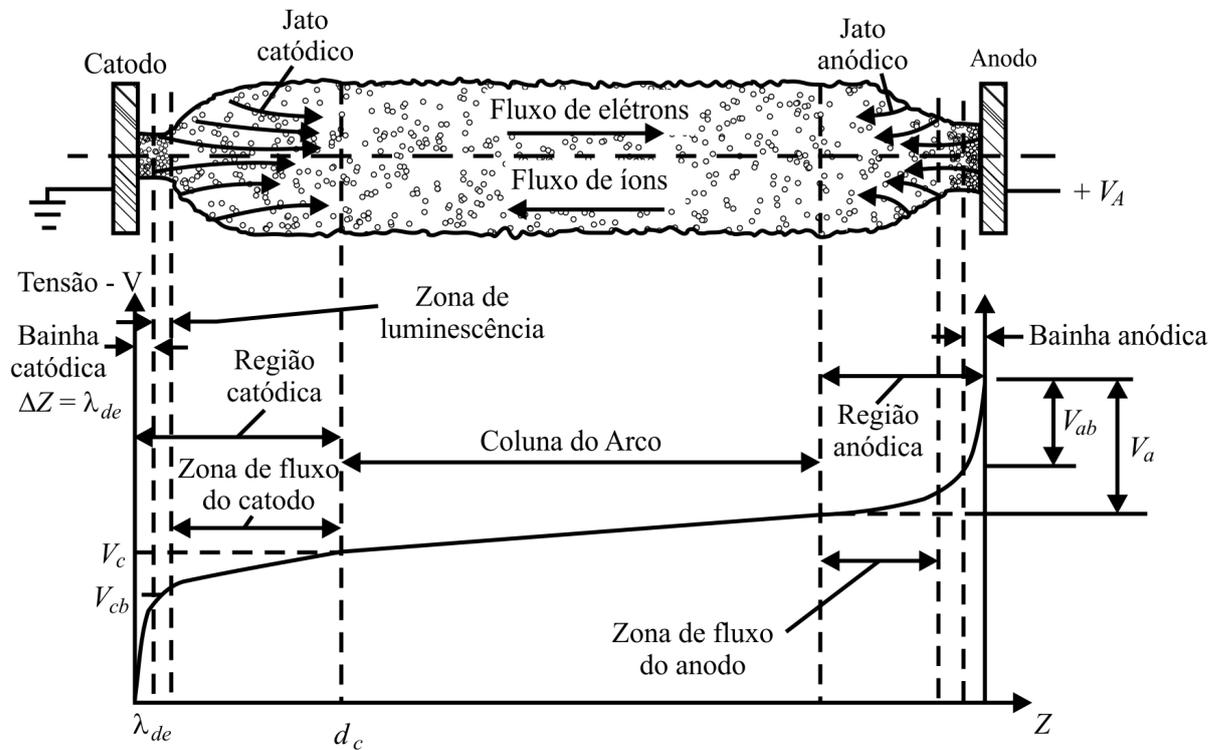
As regiões de descargas (**Figura 2.1**) podem ser classificadas da seguinte forma: a região AB, denominada regime Geiger, a qual é usada para medir intensidade de radiação – contador Geiger. Neste caso, o campo elétrico entre os eletrodos coleta parte dos íons e

elétrons existentes naturalmente no gás devido à radiação externa. Com um aumento do campo elétrico, a proporção dos íons e elétrons capturados aumenta até se atingir uma condição de saturação (ponto B), isto ocorre, praticamente, quando todos os íons produzidos são capturados. Na região BC os elétrons, acelerados pelo campo elétrico, adquirem energia cinética suficiente para provocar ionizações por impacto com átomos e/ou moléculas do gás. A região CD é chamada de descarga de “Townsend” ou descarga escura, na qual os íons acelerados produzem ionização adicional. Na região DE ocorre a ruptura do gás, “breakdown”, e a descarga passa a ser autossustentada. A região EF, denominada “Corona”, é caracterizada pela produção de um número muito grande de partículas carregadas, elétrons e íons. Na região FG, a qual é denominada de descarga subnormal, ocorre a perda de partículas por difusão lateral. O potencial da descarga decresce com um aumento vagaroso da corrente. Para a região GH, chamada de descarga luminescente normal, “glow”, o valor da descarga é baixa e apresenta, para um aumento moderado da corrente, uma voltagem praticamente constante. A região denominada adnormal – HI é caracterizada por um pequeno aumento de corrente para um aumento considerável da voltagem. Por fim, a região IL conhecida como descarga em arco, na qual ocorre uma diminuição considerável da voltagem, atingindo um valor mínimo. Esta região apresenta alta densidade de corrente e voltagem praticamente constante com o aumento da corrente. O colapso da voltagem ocorre devido ao processo de emissão termiônica no catodo, que permite a produção mais fácil de elétrons (HOYAUX, 1968; GROSS *et al.*, 1968; NASSER, 1971, ALI KETTANI, 1973, apud BARRETO, 1998; JAHN, 1968; GALLO, 1977).

As descargas elétricas em arco são divididas em três grupos: a transição entre luminescente e arco (IJ), que é caracterizada pela emissão de elétrons do catodo, emissão termoiônica, resultante de um superaquecimento no catodo decorrente de uma região de alta densidade de corrente na descarga adnormal, em torno do ponto I (**Figura 2.1**); descarga em arco não-térmico (JK); e descarga em arco térmico (KL). A partir do ponto I a descarga está em regime de arco. As regiões JK e KL podem receber nomenclaturas diferentes e a divisão entre elas não é muito clara e muitas vezes se confundem (HOYAUX, 1968, apud BARRETO, 1998; ROTH, 1995).

### 2.2.1 Característica Elétrica do Arco

A queda de tensão ao longo de um arco elétrico não é uniforme, existindo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo), as quais podem atingir um intervalo de, aproximadamente, 1 a 15 V para metais. A **Figura 2.2** mostra a variação de tensão entre os eletrodos e a localização das diferentes regiões do arco elétrico. Neste esquema, o cátodo emite elétrons com altas densidades de corrente. A bainha catódica é comparável ao comprimento eletrônico de Debye ( $\lambda_{de} \approx 1 - 10 \mu\text{m}$ ). A tensão da bainha catódica ou queda de tensão catódica pode ser, na maioria dos arcos elétricos, da ordem de 10 V (ROTH, 1995).



**Figura 2.2.** Representação esquemática das regiões de um arco linear, com a distribuição de tensão ao longo do arco (ROTH, 1995).

A região catódica possui um pequeno volume com elevados gradientes térmico e elétrico tornando muito difícil o seu estudo. Esta região é caracterizada por um estado muito afastado do equilíbrio, onde ocorre uma transição entre a coluna do arco e o eletrodo. Nesta região não ocorrem condições para o estabelecimento de equilíbrio tanto térmico (mesma energia cinética média de seus diversos constituintes) como elétrico (balanço de cargas elétricas), ao contrário do que parece ocorrer na coluna do plasma a 1 atm de pressão. Pode-se considerar que a região catódica é formada por três regiões distintas (**Figura 2.2**)

denominadas como Bainha catódica, Zona de luminescência e Zona de fluxo do catodo (ROTH, 1995).

O elevado gradiente de tensão na bainha catódica acelera os elétrons provenientes do catodo e atrai os íons positivos para o mesmo. Apesar de ser uma zona com grande atividade de cargas, nesta praticamente não ocorrem colisões entre os diversos portadores de carga e entre átomos neutros. Então, tem-se a hipótese de que um elétron, deixando o catodo, atravessa toda a bainha catódica sofrendo apenas colisões no limite exterior desta zona, o mesmo ocorrendo, em sentido contrário, com os íons positivos. Em função da ausência de choques, os elétrons, de menor massa, adquirem uma velocidade muito maior que os outros constituintes do arco, conseqüentemente, um maior número de portadores de carga positiva concentra-se na bainha catódica. Isto explica, em parte, a queda de potencial da região catódica. Devido à desaceleração dos elétrons, na zona de luminescência ocorre uma transformação de energia cinética em intensa radiação eletromagnética. A zona de fluxo do catodo é caracterizada por ser a interface entre a região catódica e a coluna do arco, onde a densidade de corrente passa dos altos valores característicos da região catódica para os valores bem menores da coluna do arco (ROTH, 1995).

Embora essencial para a continuidade do arco, a região anódica não é tão importante para a manutenção do arco como a região catódica e, por isso, foi muito menos estudada em relação à região catódica. O anodo não emite íons positivos, os quais são criados principalmente por ionização térmica na coluna do arco. Assim, na bainha anódica, há uma maior concentração de elétrons (cargas negativas) que são responsáveis pelo aparecimento de uma queda de tensão na região anódica. As dimensões desta região são comparáveis às dimensões da região catódica, exceto pelo tamanho dos pontos quentes do anodo (“spots”), os quais são maiores que os pontos quentes no catodo (ROTH, 1995).

A coluna do arco é constituída por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres, sendo estes os responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos. Esta coluna compreende praticamente todo o volume do arco. O gás do arco é aquecido até temperaturas elevadas para que ocorra a ionização. Assim, devido a grande agitação térmica, as colisões ocorrem entre os constituintes do gás levando os mesmos a uma ionização parcial e à formação do plasma (ROTH, 1995; MODENESI, 2011).

Ao aquecer um gás, as moléculas no mesmo adquirem mais energia. Com temperaturas baixas, esta energia é, principalmente, de translação, isto é, uma energia diretamente ligada à

velocidade de deslocamento das moléculas. Aumentando a temperatura, a energia vibracional de moléculas poliatômicas aumenta e, com isso, essa energia pode tornar-se suficiente para causar a ruptura ou dissociação dessas moléculas. Aumentando mais a temperatura, um elétron, das camadas mais externas do átomo, pode ser expulso, causando a ionização. Aumentando ainda mais a temperatura, ocorre a ionização múltipla, pois mais de um elétron pode ser expulso das camadas externas do átomo. A dissociação e ionização podem ser tratadas como reações químicas conforme a **Equação 2.1** e a **Equação 2.2** (JAHN, 1968; NICHOLSON, 1983; LANCASTER, 1986; BOULOS, FAUCHAIS e E PFENDER, 1994; ROTH, 1995; MODENESI, 2011):



A dissociação de um gás poliatômico em função da temperatura pode ser determinada diretamente através de considerações termodinâmicas. Por outro lado, dados termodinâmicos para a ionização são mais difíceis de serem obtidos. Então uma estimativa da variação do grau de ionização com temperaturas pode ser realizada através da equação de Saha (**Equação 2.3**):

$$\frac{\alpha^2}{(1-\alpha^2)} \frac{p}{p_o} = A_1 T^{C_p/K} \cdot \exp\left(-\frac{eV_I}{KT}\right) \quad (2.3)$$

onde,  $\alpha$ ,  $p$ ,  $p_o$ ,  $A_1$ ,  $T$ ,  $C_p$ ,  $K$ ,  $e$ , e  $V_I$  são, respectivamente, o grau de ionização, a pressão do gás ionizado, a pressão atmosférica, a constante de integração, a temperatura do plasma, o calor específico por átomo a pressão constante, a constante de Boltzmann, a carga do elétron e o primeiro potencial de ionização do gás (CAP, 1976; BOULOS, FAUCHAIS e E PFENDER, 1994; ROTH, 1995).

### 2.2.2 Modos de Emissão de Elétrons

Em plasmas de altas temperaturas existem dois principais modos de emissão de elétrons, emissão termoiônica e emissão “a frio”. Esta emissão de elétrons é fundamental para manter a existência de arco elétrico entre os eletrodos (catodo e anodo), onde elétrons devem ser emitidos em quantidades suficientes para manutenção da corrente elétrica no arco. Em uma descarga luminescente, os íons positivos são acelerados através da elevada tensão na região do catodo (100 V), os quais colidem com o catodo com elevada energia cinética de forma a causar a emissão de elétrons pelo material do mesmo. Outros modos (colisões de átomos neutros e de fótons no catodo) parecem auxiliar a emissão de elétrons neste tipo de descarga. No arco elétrico, o modo de emissão termoiônica destaca-se para catodos constituídos de materiais refratários, e os modos de emissão “a frio”, possivelmente associados com a presença de filmes de óxidos na superfície do catodo, em materiais com pontos de fusão e ebulição mais baixos (por exemplo, o cobre) (JAHN, 1968; CAP, 1976; BOULOS, FAUCHAIS e E PFENDER, 1994; ROTH, 1995).

A emissão termiônica é um fenômeno comum em válvulas eletrônicas e tubos de raios catódicos com eletrodos de tungstênio e, basicamente, resulta do aquecimento do material a uma temperatura suficientemente alta para causar a ejeção ("vaporização") de elétrons de sua superfície. A densidade de corrente resultante do efeito termiônico pode ser estimada pela **Equação 2.4** empírica de Richardson-Dushman (JAHN, 1968; CAP, 1976; BOULOS, FAUCHAIS e E PFENDER, 1994; ROTH, 1995):

$$J = A_2 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{KT}\right) \quad (2.4)$$

onde  $J$ ,  $A_2$ ,  $T$ ,  $e$ ,  $\phi$  e  $K$  são, respectivamente, a densidade de corrente elétrica, uma constante com valor entre  $6 - 7 \times 10^5$  para a maioria dos metais, a temperatura, a carga do elétron, a função-trabalho termiônica do material e a constante de Boltzmann. A função-trabalho é a energia requerida para um elétron escapar da superfície do sólido.

Existem ainda muitas dúvidas sobre qual ou quais mecanismos operam em uma dada situação para explicar a emissão “a frio”, sendo que foram propostos os seguintes mecanismos para explicar esse modo de emissão: efeito campo; efeito conjunto de campo e termoiônico;

emissão eletrônica por captura Auger de íons positivos; emissão eletrônica por fótons; emissão por átomos excitados ou metaestáveis; liberação de elétrons através de filmes de óxidos carregados com íons positivos; condução metálica em vapores formados na superfície dos catodos; e liberação de íons em vapores formados no catodo (GUILLE, 1971, *apud* MODENESI, 2011).

### 2.2.3 Ignição ou “Breakdown” de um Gás

Ruptura, ignição, iniciação ou “breakdown” de um gás é o processo de transformação de um gás de isolante para condutor elétrico. Existem três principais métodos para ionizar um gás. O primeiro, chamado de ionização térmica, implica na elevação da temperatura do gás até que colisões arranquem elétrons dos átomos. O segundo, conhecido como ionização de campo, consiste em aplicar um campo elétrico extremamente intenso e/ou de alta frequência, os quais atuam sobre os elétrons de um átomo neutro, arrancando os mesmos do átomo. O terceiro método é caracterizado pelo bombardeamento do gás com radiação de alta energia ou outras partículas subatômicas. Se a ionização alcançar valores consideráveis, acontece a ruptura do gás e produção de uma centelha (faísca – “spark”) com brilho intenso (“flash”). Se um campo externo é aplicado por um tempo suficientemente longo, a ruptura pode dar início a uma descarga, que é mantida enquanto o campo existir (PFENDER, 1978, *apud* ANGELES, 2003).

O elemento principal do processo de ruptura é a “avalancha” de elétrons, a qual se desenvolve no gás quando um campo elétrico suficientemente intenso é aplicado. Esta avalanche começa com um número pequeno de elétrons (semente – “seed”), os quais aparecem devido aos raios cósmicos. Para facilitar a ruptura, uma fonte artificial de elétrons primários é usada a fim de iniciar uma avalanche. Por exemplo, o catodo ou o gás pode ser irradiado com luz UV para produzir fotoelétrons. Um elétron livre no gás ganha energia do campo elétrico, ao alcançar energia um pouco maior que o potencial de ionização ioniza a molécula, perdendo energia desse modo. O resultado é a produção de dois elétrons lentos. Estes são novamente acelerados no campo ionizando outras moléculas e desse modo produzem outros quatro elétrons, e assim sucessivamente. A ruptura em um gás é essencialmente um processo com mínima limitação (“threshold”), isto é, significa que a ruptura é estabelecida se o campo elétrico exceder certo valor (por exemplo, a energia de

ionização). A ruptura elétrica depende, principalmente, dos seguintes parâmetros: tensão entre eletrodos; pressão, temperatura, umidade no gás; distância entre eletrodos; tipo de gás; geometria dos eletrodos; frequência do campo elétrico aplicado, entre outras (RAIZER, 1997, *apud* ANGELES, 2003).

A tensão de ruptura de um gás é uma função não linear (**Equação 2.5**), dada pela Lei de Paschen, a qual depende somente do produto  $pd$ :

$$V_r = V(pd) \quad (2.5)$$

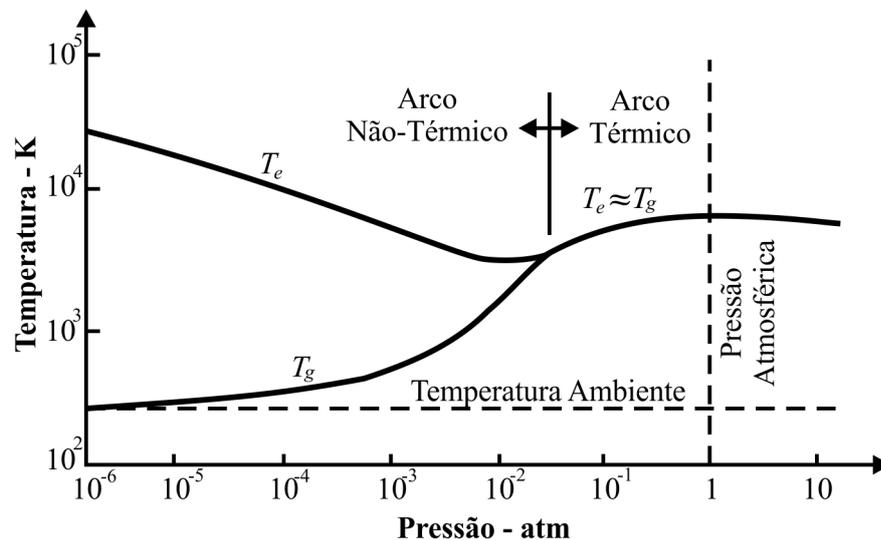
onde,  $V_r$  é a tensão de ruptura,  $p$  é a pressão e  $d$  é a distância entre os eletrodos (anodo e catodo). Normalmente, quanto maior a voltagem, a frequência, a temperatura, a umidade e menor o potencial de ionização do gás, mais fácil é a ruptura.

#### 2.2.4 Parâmetros do Plasma e Equilíbrio Termodinâmico Local

A **Tabela 2.1** apresenta alguns parâmetros de plasmas gerados por descargas elétricas em arco não térmico e térmico. Geralmente, os arcos não térmicos ocorrem em baixa pressão, enquanto que os arcos térmicos ocorrem em alta pressão e alta temperatura. A variação de temperatura das partículas ativas no plasma em função da pressão do gás para arcos térmicos e não térmicos é ilustrado na **Figura 2.3**. A região térmica caracteriza-se pelo fato de que as temperaturas eletrônica, iônica e das partículas neutras serem praticamente iguais ( $T_e \approx T_g$ ). Nesta situação, tem-se o denominado equilíbrio termodinâmico local (ETL), isto é, cada região do plasma pode ser definida por uma temperatura única; entretanto, o equilíbrio é meramente local, podendo existir fluxos de calor associados com gradientes de temperatura através da descarga. Normalmente a análise deste tipo de descarga é feita utilizando-se uma equação para a distribuição de temperatura, considerando as diferentes fontes de calor, as trocas de calor, o gradiente de temperatura, etc. Por exemplo, tem-se a equação de Saha, descrita anteriormente, para determinar o grau de ionização do gás (BOULOS, FAUCHAIS e PFENDER, 1994; ROTH, 1995; BARRETO, 1998; MODENESI, 2011).

**Tabela 2.1.** Alguns parâmetros de plasmas gerados por descargas elétricas em modo de arco não-térmico e térmico (ROTH, 1995).

Parâmetros do plasma	Arco não-térmico	Arco térmico
Estado de equilíbrio	Cinético	Equilíbrio termodinâmico local
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 eletrônica – $T_e$ (eV)	$0,2 < T_e < 2$	$1,0 < T_e < 10,0$
Temperatura do gás – $T_g$ (eV)	$0,025 < T_g < 0,5$	$T_e = T_g$
Intensidade de Corrente Elétrica – $I$ (A)	$1 < I < 50$	$50 < I < 10^4$
$E/p$ (V/Pa.m)	Alta	Baixa
$IE$ (kW/m)	$IE < 10,0$	$IE > 10,0$
Emissão catódica	Termoiônica	Campo
Intensidade Luminosa	Brilhante	Ofuscante
Transparência	Transparente	Opaca
Fração de Ionização	Indeterminada	Equação de Saha
Saída de Radiação	Indeterminada	Equilíbrio termodinâmico local

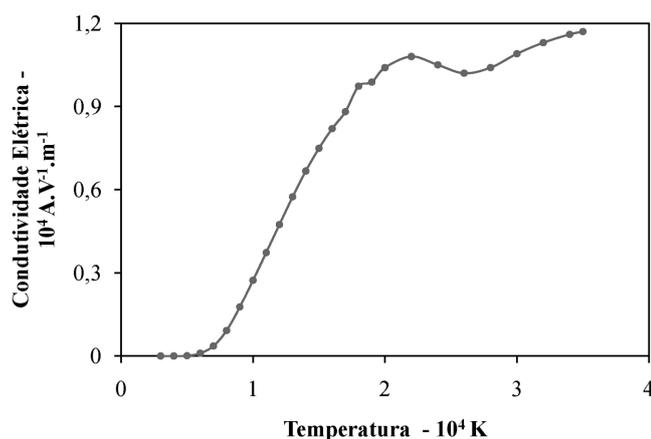


**Figura 2.3.** Típico comportamento da temperatura das partículas do plasma (elétrons e do gás) em função da pressão (ROTH, 1995).

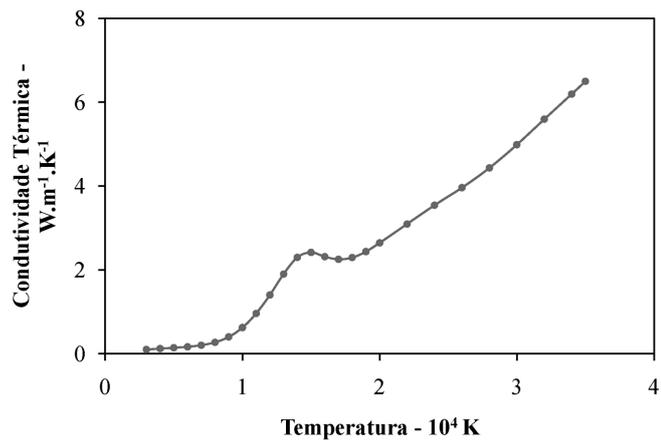
O fato de a temperatura eletrônica exceder a temperatura iônica e das partículas neutras em pelo menos duas ordens de grandeza é o que caracteriza a região não térmica – plasma

“frio”. Nestas condições os elétrons apresentam um livre caminho médio, relativamente, grande e recebem uma grande quantidade de energia do campo elétrico enquanto perdem energia por colisões com as partículas pesadas.

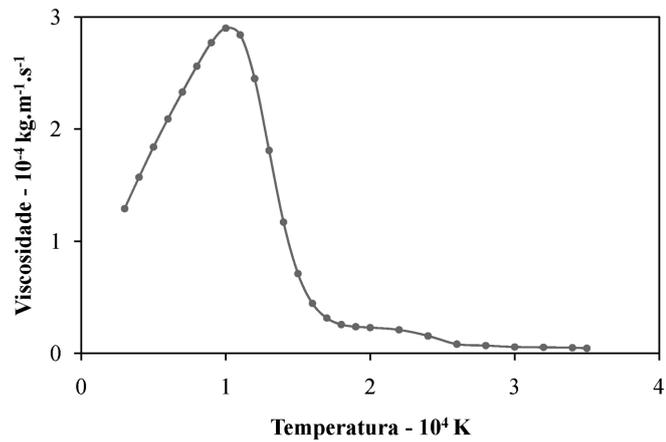
As propriedades termodinâmicas (densidade, calor específico, etc.) e coeficientes de transporte (condutividade térmica, condutividade elétrica, viscosidade, etc.) do gás são de fundamental importância para o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem o comportamento do plasma. Estas propriedades são fortemente dependentes da temperatura do gás e podem ser calculadas ou adquiridas experimentalmente. A **Figura 2.4**, **Figura 2.5**, **Figura 2.6** e **Figura 2.7** apresentam, respectivamente, a condutividade elétrica, condutividade térmica, a viscosidade e a densidade, todas em função da temperatura, para o gás argônio (LANCASTER, 1986; BOULOS, FAUCHAIS e E PFENDER, 1994). Geralmente os modelos de tochas de plasmas são formulados através de aproximações que envolvem conceitos físicos de mecânica dos fluidos, de transferência de calor e de magneto eletrodinâmica. As equações de equilíbrio (transferência de massa, energia e momento) são altamente acopladas, por um lado, implicitamente, porque todas às propriedades termodinâmicas e coeficientes de transportes dependem da temperatura e, por outro lado, explicitamente, porque, principalmente, o fluxo de gás depende das forças eletromagnéticas, as temperaturas dependem do efeito Joule e o campo elétrico depende da distribuição e do valor da temperatura (MURPHY, TANAKA, *et al.*, 2009 apud BAUCHIRE, BERTRAND e IZARRA, 2009; TRELLES, CHAZELAS, *et al.*, 2009).



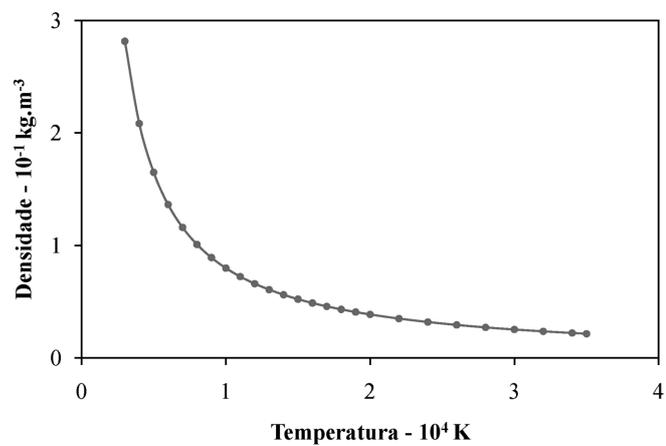
**Figura 2.4.** Condutividade elétrica em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).



**Figura 2.5.** Condutividade térmica em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).



**Figura 2.6.** Viscosidade em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).



**Figura 2.7.** Densidade de massa em função da temperatura para o gás argônio (LANCASTER, 1986).

Geralmente as aproximações para descrever os campos de temperatura, os perfis de velocidade, as densidades de corrente elétrica, os campos elétricos, são realizadas através das equações Navier-Stokes (magneto hidrodinâmica), onde um gás ionizado no interior de uma câmara é considerado como um fluido contínuo, cujas observáveis macroscópicas podem ser adequadamente descritas por equações com parâmetros de volume e cujos comportamentos dinâmicos podem ser representados por contínuas conservações de massa, momentum e energia (MAECKER, 1955; JAHN, 1968; BEJAN, 1993; INCROPERA e DEWITT, 1996; BATCHELOR, 2000; SANKARAN, 2005).

### **2.3 Características e Tipos de Tochas à Plasma**

As “tochas” de plasmas são constituídas, basicamente, de eletrodos coaxiais, sendo o interno o catodo, normalmente construído de materiais refratários, tais como tungstênio e molibdênio, e o externo sendo o anodo, normalmente de cobre, isolados eletricamente e refrigerados a água (ROTH, 1995; SOLONENKO, 2003; ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

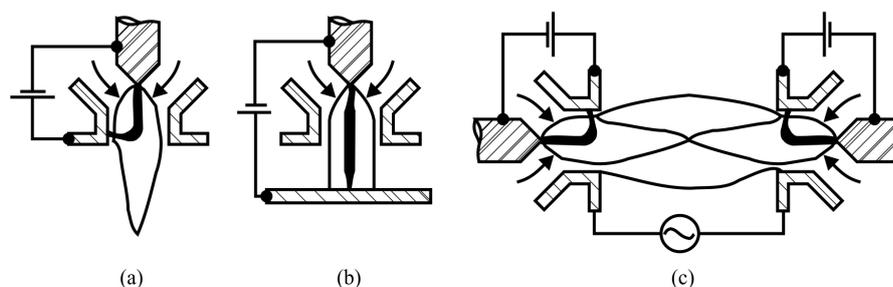
O gás de trabalho é admitido e aquecido pelo arco elétrico, formando um jato de plasma com altas temperaturas, geralmente com velocidades supersônicas, passando através de um bocal. Uma camada externa de gás fluindo ao redor do arco permanece relativamente fria e forma um isolador térmico e elétrico entre o jato de plasma e o bocal, protegendo-o, desta forma, da erosão. A expansão do jato de plasma depende dos seguintes parâmetros: corrente elétrica de descarga; dimensões; geometria e refrigeração dos eletrodos; e do fluxo de gases. Dependendo destes parâmetros o jato de plasma pode ser mais ou menos estável e apresentar variações na tensão e na potência de descarga (ROTH, 1995; ESIBYAN, 1973, apud BARRETO, 1998; SOLONENKO, 2003; ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

O rápido aquecimento pela descarga elétrica proporciona a dissociação do gás promovendo uma alta velocidade através do orifício da câmara de ionização. Variando-se a forma geométrica do bocal (diâmetro, comprimento e ângulo de inclinação), o volume da cavidade e a potência elétrica de entrada, pode-se controlar a temperatura eletrônica, a constituição de plasma (as espécies produzidas) e a dinâmica do jato formado (BARRETO, 1998).

### 2.3.1 Classificação das Tochas de Plasmas

As tochas de plasmas são classificadas quanto à forma de aplicação da corrente (arcos indiretos ou não-transferido, arcos diretos ou transferidos e arcos sobrepostos); quanto ao método de estabilização da “tocha” (estabilização por parede, por parede segmentada, por parede porosa, por turbulência, por vórtice e estabilização magnética) ou quanto ao tipo de corrente elétrica (ROTH, 1995; MACHADO, 1996; VENKATRAMANI, 2002; ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

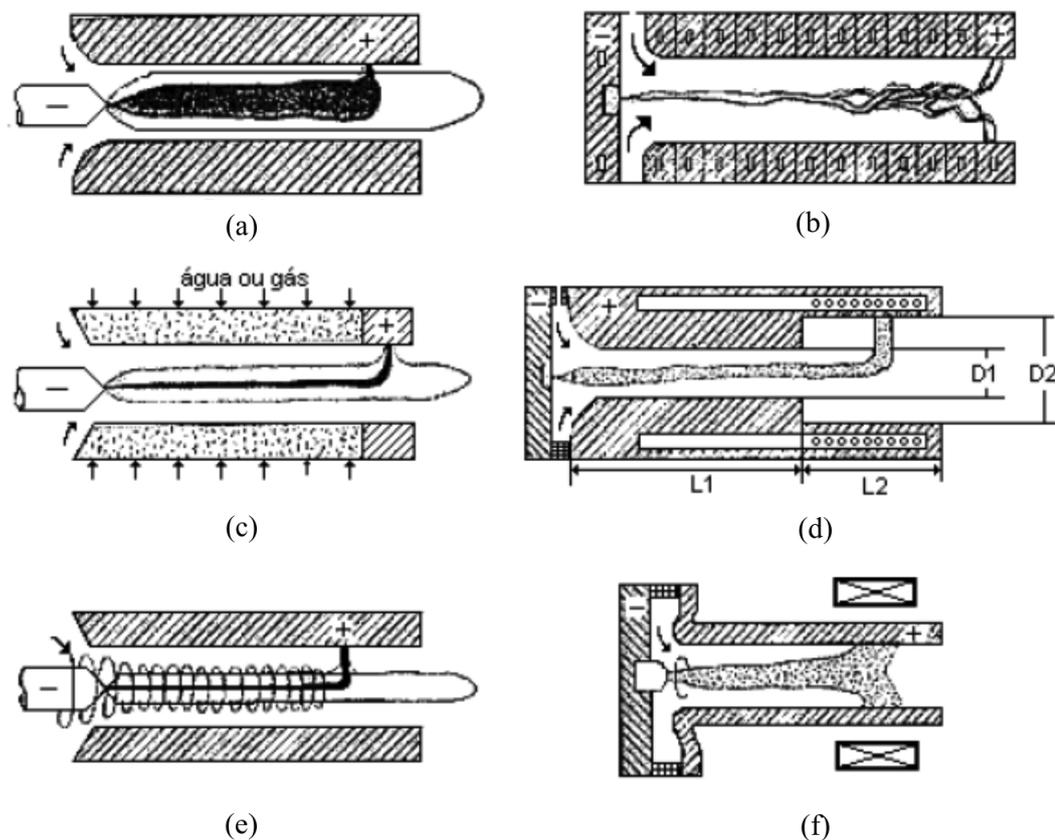
No caso dos arcos indiretos ou não-transferidos a descarga ocorre entre o catodo e o anodo (bocal), apresentando altas temperaturas e potência térmica. A energia térmica é transferida para a peça de trabalho (um substrato) pelo jato de plasma aquecido. Tochas de plasmas usando este tipo de arco são normalmente usados em processos de aspersão térmica (“thermal spray”), aquecimento de superfícies, sintetização, etc. Já nos arcos diretos ou transferidos a descarga ocorre entre o catodo e o anodo (peça de trabalho). O bocal é isolado eletricamente e funciona somente como redutor de área, e auxilia na estabilização da descarga. Neste caso, o calor é aplicado diretamente na peça de trabalho devido a passagem de corrente elétrica, efeito Joule. Como a eficiência deste processo é maior, os mesmos são, normalmente, usados para soldagem e cortes a plasmas. Também, dependendo da aplicação, existem os arcos indiretos e diretos conjuntamente. Na **Figura 2.8a** é apresentado uma tocha de arco indireto, ilustrando o circuito elétrico conectado entre o catodo e o anodo. A **Figura 2.8b** mostra o desenho esquemático de uma tocha de arco direto, a qual ilustra o circuito elétrico conectado entre o catodo e o anodo (peça de trabalho). Este tipo de arco, geralmente utilizado para soldagem e corte térmico, é aquele em que o catodo está na tocha, mas o anodo está na carga a ser fundida ou tratada, o arco sai da tocha e se fecha num material externo.



**Figura 2.8.** Configuração de arco: (a) indireto ou não-transferido, (b) direto ou transferido e (c) sobreposto (MARROTA, 1991, apud COUTINHO, 2007).

O tipo de arco sobreposto acontece quando duas ou mais tochas são combinadas e interligadas por fonte de potência, normalmente alternada, através do plasma. As tochas podem ser ligadas aos pares conforme a **Figura 2.8c**, ou em três, formando um sistema trifásico, o qual é chamado de tocha trifásica. Também existem sistemas com mais de três fases, conhecidos como sistemas multifásicos. Este tipo de tocha é utilizado quando altas potências são requisitadas (RAVARY, *et al.*, 1998, apud COUTINHO, 2007; WEIDONG, *et al.*, 2006; YAO, *et al.*, 2008).

A estabilização por parede (**Figura 2.9a**) consiste, geralmente, em um canal metálico de diâmetro constante, onde o arco é autoestabelecido. Uma vez estabelecido, o comprimento do arco é controlado pelo fluxo e tipo de gás. As tensões de operação são medianas e o comprimento do arco pode ser de 10 a 15 vezes o diâmetro do canal. A estabilização por parede segmentada (**Figura 2.9b**) apresenta as mesmas características da estabilização por parede, porém o canal é constituído por diversas secções de materiais condutores e isolantes intercalados. Com isso, o anodo pode ser posicionado adequadamente para manter o comprimento do arco fixo. Este sistema permite operações com altas tensões de, aproximadamente, 1000 V. Na estabilização por parede porosa (**Figura 2.9c**) o arco elétrico é confinado através de um canal constituído de material poroso, onde é injetado gás ou água. No caso da estabilização por turbulência (**Figura 2.9d**), o canal metálico possui diâmetros diferentes que provocam uma turbulência no canal, com isso facilita o encontro do arco elétrico com a parede metálica. Neste caso, as tensões de operação são baixas e o comprimento do arco é da ordem de 5 a 8 vezes o menor diâmetro do canal. Em geral, a estabilização por vórtice (**Figura 2.9e**) é utilizada em conjunto com as técnicas anteriores. Neste sistema o gás entra no canal em forma de vórtice gerando um gradiente de pressão radial, onde a menor pressão concentra-se no centro do canal mantendo o arco centralizado. No caso da estabilização magnética (**Figura 2.9f**) um campo magnético externo é aplicado ao arco fazendo com que o mesmo gire no próprio eixo e se mantenha na região determinada pelo campo. Este tipo de estabilização, embora menos eficiente que a estabilização por vórtice, possibilita controlar a expansão da tocha independentemente do fluxo de gases. Este tipo de estabilização muitas vezes é utilizado para promover uma movimentação do “spot” do catodo, aumentando assim a sua durabilidade. (ESIBYAN, 1973, apud BARRETO, 1998; RAVARY, *et al.*, 1998, apud COUTINHO, 2007).

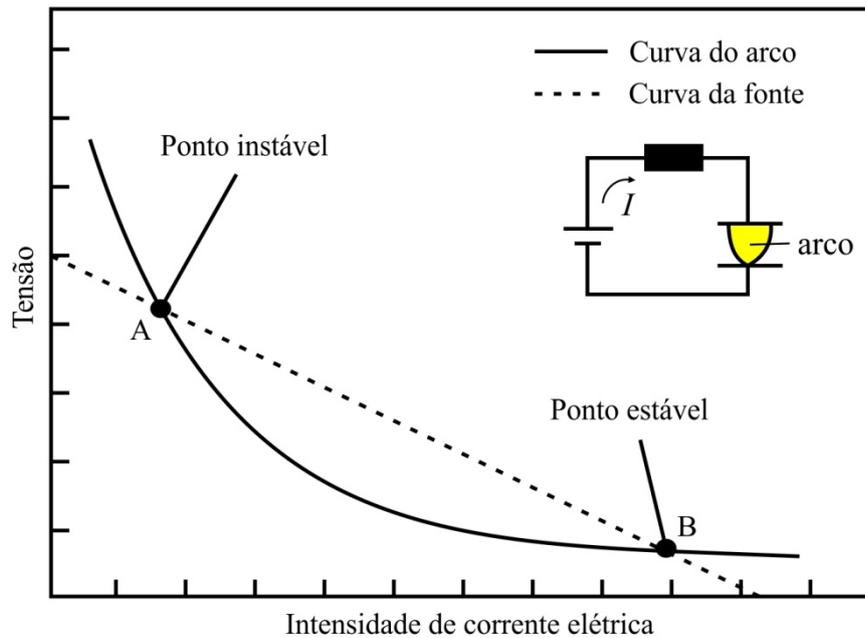


**Figura 2.9.** Tipos de estabilização do arco em tochas de plasma: (a) parede; (b) parede segmentada; (c) parede porosa; (d) turbulência; (e) vórtice; e (f) magnética (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

Além da estabilização do arco, existe a necessidade de uma estabilização elétrica, relacionada com o circuito elétrico. A **Figura 2.10** apresenta a curva característica do arco e da fonte, na qual existem dois pontos onde as curvas se interceptam, o ponto A e o ponto B. A tocha opera somente no ponto B com estabilidade, por outro lado, no ponto A ocorre a instabilidade. Analisando a partir do ponto A para a esquerda, tem-se que na curva da tocha a tensão da fonte é menor do que a requerida pelo arco causando a extinção do mesmo. Já o ponto à direita de A, ocorre o contrário, a tensão da fonte é maior que a requerida pelo arco, logo, a corrente tenderá a aumentar, no sentido indicado pela seta. Logo, o ponto A é instável. Analogamente, na vizinhança do ponto B à esquerda, na curva da tocha, a tensão da fonte correspondente é maior do que a requerida pelo arco, portanto, o arco tende ao ponto de maior corrente (ponto B). À direita do ponto B a tensão da fonte é menor que a requerida pelo arco, então, a corrente tende a diminuir, no sentido do ponto B, com isso pode-se dizer que o ponto B é estável. Este fato é expresso pelo critério de estabilidade de Kaufman, onde o ponto

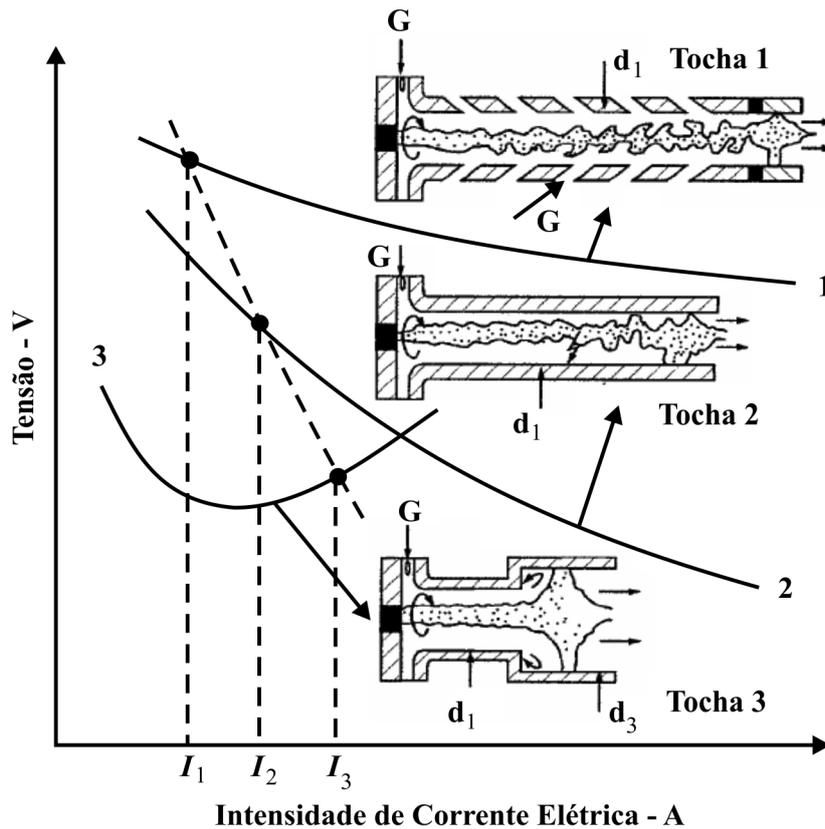
estável de operação é dado por (HOYAUX, 1968, GROSS, CRYRZ e MIKLOSSY, 1968, apud BARRETO, 1998; ROTH, 1995; PFENDER, 1978; MODENESI, 2011):

$$\left| \frac{dV}{dI} \right|_{\text{fonte}} > \left| \frac{dV}{dI} \right|_{\text{tocha}} \quad (2.6)$$



**Figura 2.10.** Curva característica do arco e da fonte, apresentando o ponto de estabilização elétrica (BARRETO, 1998).

A característica de tensão versus corrente é uma das mais importantes características das tochas de plasma, as quais podem ter características descendentes (resistência diferencial negativa) ou ascendentes (resistência diferencial positiva). Também, as tochas podem ser de comprimento de arco autoestabelecido (curva 2, **Figura 2.11**) ou fixo. O comprimento de arco fixo é obtido através da utilização de um anodo degrau (curva 3, **Figura 2.11**) ou injeção radial de gás ao longo do canal (curva 1, **Figura 2.11**). As tochas de comprimento de arco autoestabelecido são descendentes. Enquanto que as de arco fixo podem apresentar ambos os comportamentos. As tochas de arco transferido são sempre do tipo fixo e com característica ascendente na faixa operacional (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).



**Figura 2.11.** Classificação das Tochas de Plasmas (ZHUKOV e ZASYPKIN, 2007).

Não existe um modelo teórico único para obter a curva característica para uma descarga elétrica em arco, apesar deste tipo de descarga ser conhecido desde 1806. Na literatura é possível encontrar vários modelos fenomenológicos sendo os mais conhecidos os de Ayrton, para descargas não térmicas e de Eberhart-Seban para arcos térmicos. Em nenhum deles as relações entre tensão e corrente são bem definidas. A curva de Ayrton, 1902, foi obtida considerando uma descarga em arco em ar, na pressão atmosférica, para eletrodos de carbono, tendo como parâmetro a distância entre os eletrodos, e é dada por (PFENDER, 1978; ROTH, 1995):

$$U = A + B \cdot d + \frac{C+D \cdot d}{I} \quad (2.7)$$

onde,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são constantes,  $d$  é o comprimento do arco elétrico e  $I$  é a intensidade de corrente elétrica. Esta relação empírica é aplicável somente aos arcos com características descendentes, pois a intensidade de corrente elétrica aparece no denominador da **Equação 2.7**.

Em 1966, Eberhart-Seban, encontraram que as características ( $U \times I$ ) de um arco térmico com argônio, com altas correntes, e com o anodo esfriado por água podem ser representadas por (PFENDER, 1978; ROTH, 1995):

$$U = 4,3I^{0,25}d^{0,3} \quad (2.8)$$

A **Equação 2.8** é válida para  $5 \cdot 10^{-3} \leq d \leq 31,5 \cdot 10^{-3}$  m e  $200 \leq I \leq 2300$  A.

Apesar da existência destes modelos para as curvas características, o de Ayrton (**Equações 2.7**) para arcos não térmicos e o de Eberhart-Seban (**Equação 2.8**) para arcos térmicos, a teoria não está completamente embasada, pois ainda não foi identificado um processo físico responsável pela relação  $U \times I$ . Estas curvas relacionam dados experimentais e teóricos. Para outros tipos de experimentos estas curvas podem não ser válidas, sendo necessário desenvolver um modelo teórico mais apropriado (BARRETO, 1998).

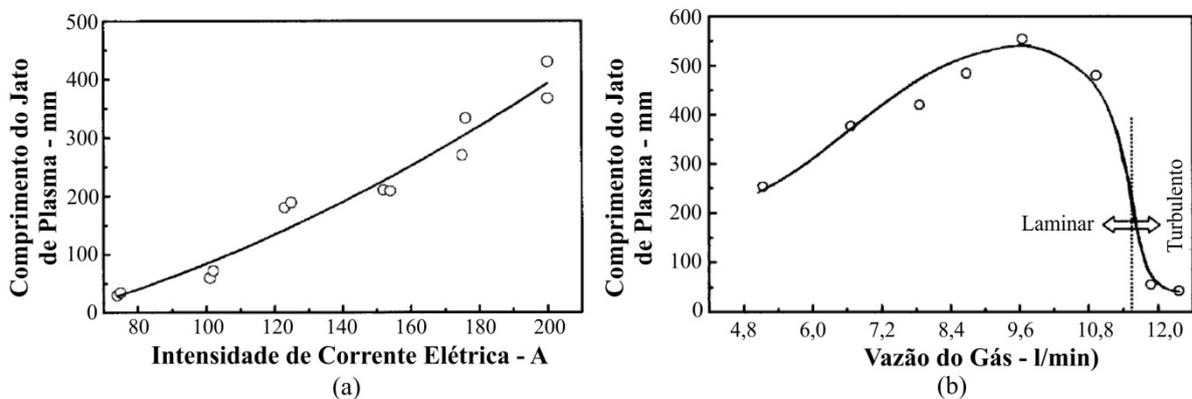
### 2.3.2 Jato de Plasma em Tochas de arco Não-Transferido

Os jatos de plasma em tochas de plasma não-transferido podem ser laminares ou turbulentos. Normalmente, este tipo de tocha de plasma opera com jato de plasma turbulento, onde ocorre uma rápida mistura do fluxo turbulento do jato com a atmosfera circundante resultando em um jato de pequeno comprimento com gradiente de temperatura elevado na direção axial. O jato turbulento causa dificuldade no controle de processos e limita a aplicação à tecnologia de materiais de alta precisão e reprodutibilidade. O jato de plasma estável (laminar) proporciona maior controle no processamento de materiais. Estes jatos apresentam grandes comprimentos e reduzido gradiente de temperatura ao longo da direção axial (PAN, *et al.*, 2002).

A intensidade de corrente elétrica e a vazão do gás são as principais variáveis que causam alterações significativas no comprimento e no tipo (turbulento ou laminar) do jato de plasma. Aumentando a intensidade de corrente elétrica o comprimento do jato de plasma aumenta. Quando a vazão do gás aumenta, o comprimento do jato de plasma também aumenta até o início da transição do fluxo de plasma laminar para o fluxo de plasma

turbulento, onde o comprimento do jato de plasma começa a diminuir (PAN, ZHANG, *et al.*, 2002; LERMEN e MACHADO, 2006).

A **Figura 2.12a** apresenta o gráfico do comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica para uma vazão do gás de 7,2 l/min e a **Figura 2.12b** apresenta o gráfico do comprimento do jato de plasma em função da vazão do gás com uma tocha de plasma não-transferido operando com intensidade de corrente elétrica de 200 A. (PAN, *et al.*, 2002).



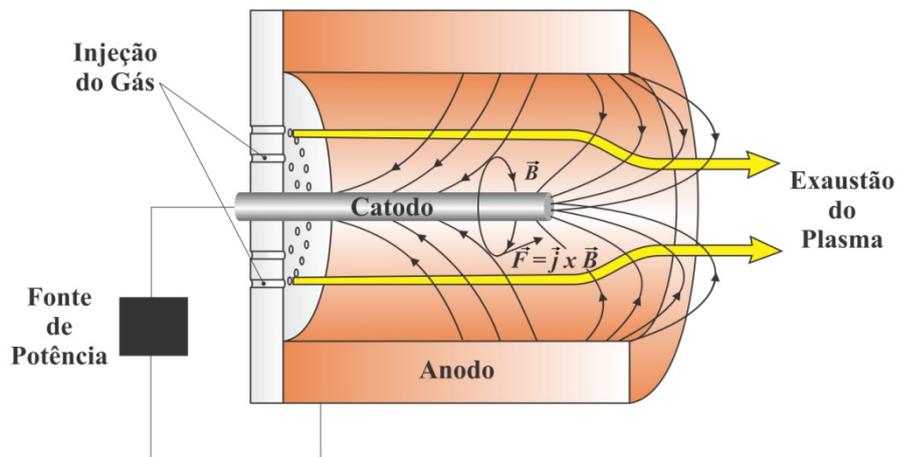
**Figura 2.12.** (a) Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica e (b) comprimento do jato de plasma em função da vazão do gás (PAN, *et al.*, 2002).

### 2.3.3 Propulsor Eletromagnético - MPDT

O estudo dos propulsores eletromagnéticos – MPDT parte do pressuposto que alta densidade de corrente em uma câmara acaba gerando um campo magnético intenso, capaz de produzir grande aceleração eletromagnética de um fluxo de gás. Com isso, cientistas de várias instituições, através das modificações nas variáveis operacionais dos convencionais “arcjets” (propulsores eletrotérmicos) constataram um aumento na escala de exaustão do gás, ou seja, com aumento da corrente elétrica e diminuição do fluxo de gás na câmara, o dispositivo passa a ter maior rendimento em relação a propulsão, mas os problemas de desgastes dos eletrodos aumentavam. Para diminuir o desgaste dos eletrodos foi adicionada ao dispositivo uma bobina externa a câmara, a qual gera um campo magnético externo que acelera as partículas e estabiliza o plasma exaustado. Essas modificações significativas nos propulsores eletrotérmicos levam a uma nova formulação de modelos físicos para o funcionamento desses dispositivos, gerando então uma nova classe de propulsores, onde diferentes tipos de gases,

geometrias dos eletrodos, taxas do fluxo de gás, níveis de tensão e intensidades de corrente elétrica, e intensidades de campos magnéticos externos foram experimentados e catalogados (JAHN, 1968).

O dispositivo conhecido como propulsor magnetoplasmadinâmico (“Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT”) caracteriza-se por uma geometria coaxial constituída por um catodo central e um anodo cilíndrico em forma de câmara, os quais são isolados eletricamente. Um gás é injetado através de orifícios gerando um fluxo na câmara, onde é ionizado através da passagem pela descarga elétrica entre os eletrodos (catodo e anodo), gerada por uma fonte de energia com dispositivo gerador de alta frequência. Através desse plasma (gás ionizado) surge uma densidade de corrente radial, a qual atravessa o gás em direção ao catodo. Esta corrente no catodo gera um campo magnético circunferencial, o qual interage com a densidade de corrente aparecendo uma força eletromagnética, conhecida como “força de Lorentz” ( $\vec{J} \times \vec{B}$ ), a qual acelera as partículas e é também responsável pela expulsão do gás ionizado para fora da câmara. Um esquema básico do dispositivo magnetoplasmadinâmico – MPDT com a representação das linhas de densidade de corrente é mostrado na **Figura 2.13** (JAHN, 1968; JAHN e CHOUEIRI, 2002).



**Figura 2.13.** Representação esquemática de um dispositivo magnetoplasmadinâmico (MPDT) (CHOUEIRI, 2004).

Um modelo analítico baseado na descrição contínua da propulsão eletromagnética foi desenvolvido por Maecker e mais tarde esclarecido por Jahn, tendo como resultado a seguinte expressão (MAECKER, 1955; JAHN, 1968):

$$F_z = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln \left( \frac{r_a}{r_c} + A \right) \quad (2.9)$$

onde  $r_a$  e  $r_c$  são, respectivamente, o raio do anodo e do catodo; e  $A$  é uma constante adimensional que depende da distribuição de corrente elétrica na extremidade do catodo, a qual varia entre 0 e 1 (TILLACK e MORLEY, 1998). Este modelo é descrito detalhadamente por Jahn através de seu livro “*Physics of Electric Propulsion*”.

Este resultado é independente da trajetória específica do arco de corrente entre o anodo e o catodo, e é apropriado para a propagação do arco de corrente padrão observado em arcos de magnetoplasmadinâmicos. Também, os modelos descritos por Maecker e Jahn, não abordam a contribuição eletrotérmica, o fluxo de gás na câmara e o tipo de gás (TILLACK e MORLEY, 1998).

O modelo descrito por Tichonov aprimora a formula de Maecker através da seguinte expressão (TIKHONOV e SEMENIHIN, 1993; MAECKER, 1955):

$$F = \frac{\mu}{4\pi} \left( \frac{\gamma+1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{8\pi a_0 \dot{m}}{\gamma \mu J^2} \right)^2 \right) J^2 \quad (2.10)$$

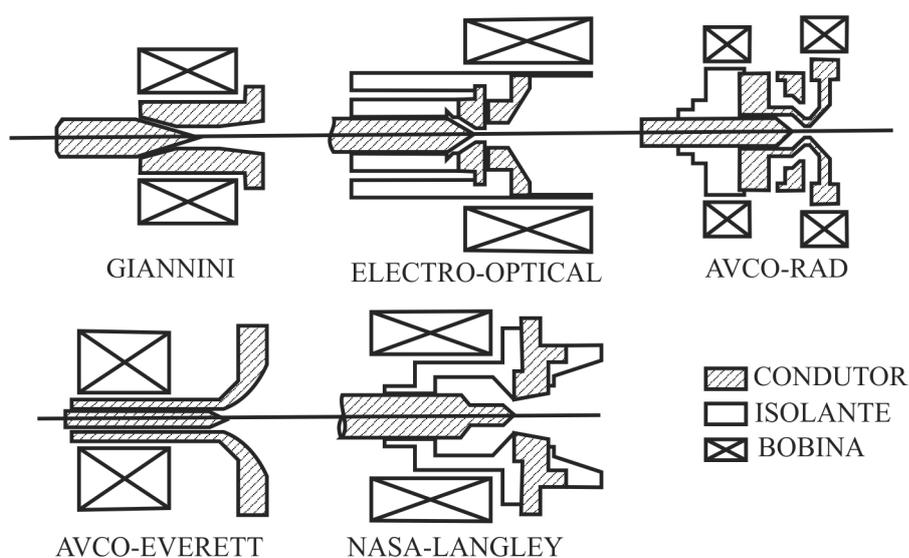
onde  $a_0$  é a velocidade acústica do íon. Esse modelo é formulado analiticamente através da magnetohidrodinâmica em uma dimensão, considerando limite livre para a vazão do gás na câmara do dispositivo. Também, o modelo descrito por Choueiri aprimora a formula de Maecker, o qual considera as variações na corrente elétrica e no tipo de gás. Esse modelo é de caráter semi-empírico, pois, devem-se considerar alguns dados experimentais para a distribuição de corrente entre os eletrodos e a distribuição de pressão na câmara interna do MPDT.

Em nenhum dos modelos descritos anteriormente foi abordada a contribuição eletrotérmica, característica dos propulsores eletrotérmicos (“arcjets” e tochas de plasmas tradicionais), a qual é menor que 10% para os dispositivos eletromagnéticos e depende do tipo de gás, do fluxo de gás e da corrente elétrica, sendo que para o argônio pode ser descrita pela seguinte equação (BURTON, CLARK e JAHN, 1983):

$$F_{Te} = 0,098(\dot{m})^{0,3}I^{1,5} \quad (2.11)$$

onde  $\dot{m}$  é a taxa do fluxo de massa de gás injetada na câmara do dispositivo (em g/s) e  $I$  é a intensidade de corrente elétrica (em kA).

Outro fator de extrema importância no desenvolvimento destes dispositivos é a geometria dos eletrodos (catodo e anodo), onde as dimensões do catodo e do anodo influenciam consideravelmente na propulsão do plasma exaustado para fora da câmara, tendo como exemplo, os raios dos eletrodos, os quais aparecem explicitamente nos modelos descritos anteriormente (MAECKER, 1955; JAHN, 1968). Estas geometrias devem ser escolhidas de acordo com a dinâmica dos gases, a qual descreve o comportamento de fluidos em certo sistema. Algumas configurações geométricas de MPDTs com suas respectivas instituições de desenvolvimento são apresentadas na **Figura 2.14** (CLARK e JAHN, 1967).



**Figura 2.14.** Configurações de alguns MPDTs (CLARK e JAHN, 1967).

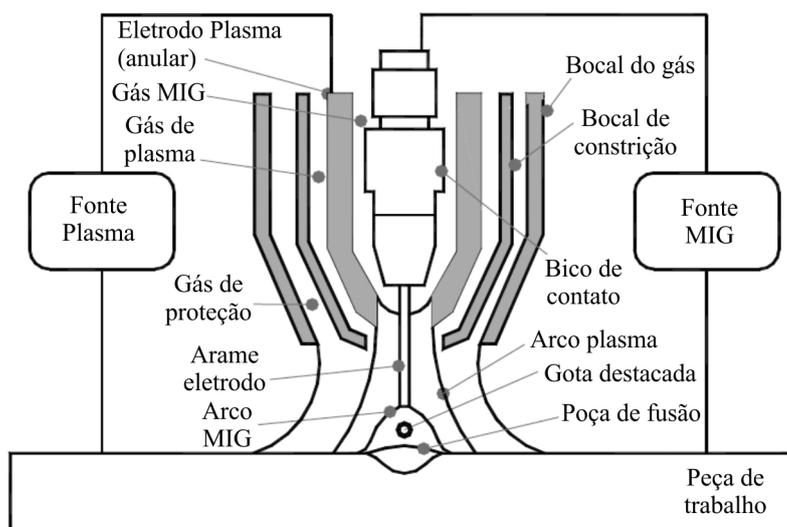
#### 2.3.4 Tochas Híbridas

As tochas híbridas são caracterizadas por utilizar simultaneamente dois ou mais processos em apenas um dispositivo, por exemplo, tocha para soldagem Plasma/MIG, tocha de plasma com duplo anodo, entre outras. Estas tochas são, geralmente, confeccionadas para adquirir vantagens ou características diferentes em relação aos processos de fabricação

convencionais (MESSLER, 2004). A seguir, uma sucinta descrição das tochas híbridas (Plasma/MIG e duplo anodo) é realizada, pois, em alguns aspectos, essas tochas serviram de modelo na confecção de peças para a tocha construída na presente tese.

No conceito original das tochas híbridas Plasma/MIG utiliza-se um eletrodo de tungstênio, o mesmo das soldagens Plasma e TIG, para a geração do arco plasma. Este eletrodo é localizado ao lado do bico de contato MIG. Em função do alto desgaste do eletrodo de tungstênio em atmosferas oxidantes, o gás de plasma utilizado neste tipo de tocha deve ser de natureza inerte. Normalmente utiliza-se argônio, hélio ou mistura dos mesmos, sendo que a utilização de misturas de argônio com hidrogênio também são utilizadas. O gás de proteção pode ser de natureza ativa, já que este fluxo não entra em contato com o eletrodo de tungstênio. Misturas de argônio com CO<sub>2</sub> são tipicamente utilizadas como gás de proteção na soldagem de aços ao carbono. Na soldagem de não ferrosos, normalmente utiliza-se argônio puro e misturas com hélio (OLIVEIRA, 2006).

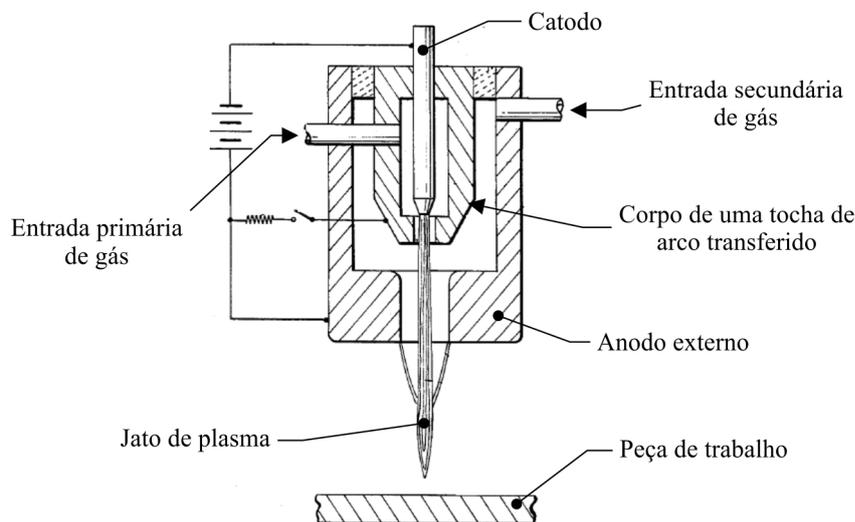
Um modelo desenvolvido recentemente de tocha híbrida caracteriza-se pelo fato do eletrodo pontiagudo de tungstênio (conceito original) ser substituído por um eletrodo em forma de anel. Este eletrodo anular é confeccionado em cobre, e pode ser equipado com um inserto de grafite, ou de tungstênio. Um desenho esquemático deste modelo de tocha é apresentado pela **Figura 2.15** (ESSERS, *et al.*, 1981).



**Figura 2.15.** Representação esquemática de uma tocha de soldagem Plasma/MIG equipada com eletrodo anular de cobre (ESSERS, *et al.*, 1981).

As partes mais importantes da tocha de soldagem (bico de contato, eletrodo plasma e bocal constritor) devem ser constantemente refrigeradas com um líquido refrigerante (por exemplo, água). Como o cobre possui um alto coeficiente de condutividade térmica, o arrefecimento do eletrodo plasma garante a manutenção de sua temperatura em níveis baixos. Isto impede o desgaste excessivo do eletrodo plasma devido a utilização de altas correntes em polaridade reversa (reconhecidamente melhor para a transferência metálica no processo MIG/MAG), de gases ativos como CO<sub>2</sub> e de misturas dos mesmos com argônio. Além destas vantagens, esta tocha, quando equipada com eletrodo anular, é mais compacta, simétrica e apresenta maior praticidade na manutenção (OLIVEIRA, 2006; RESENDE, FERRARESI, *et al.*, 2009).

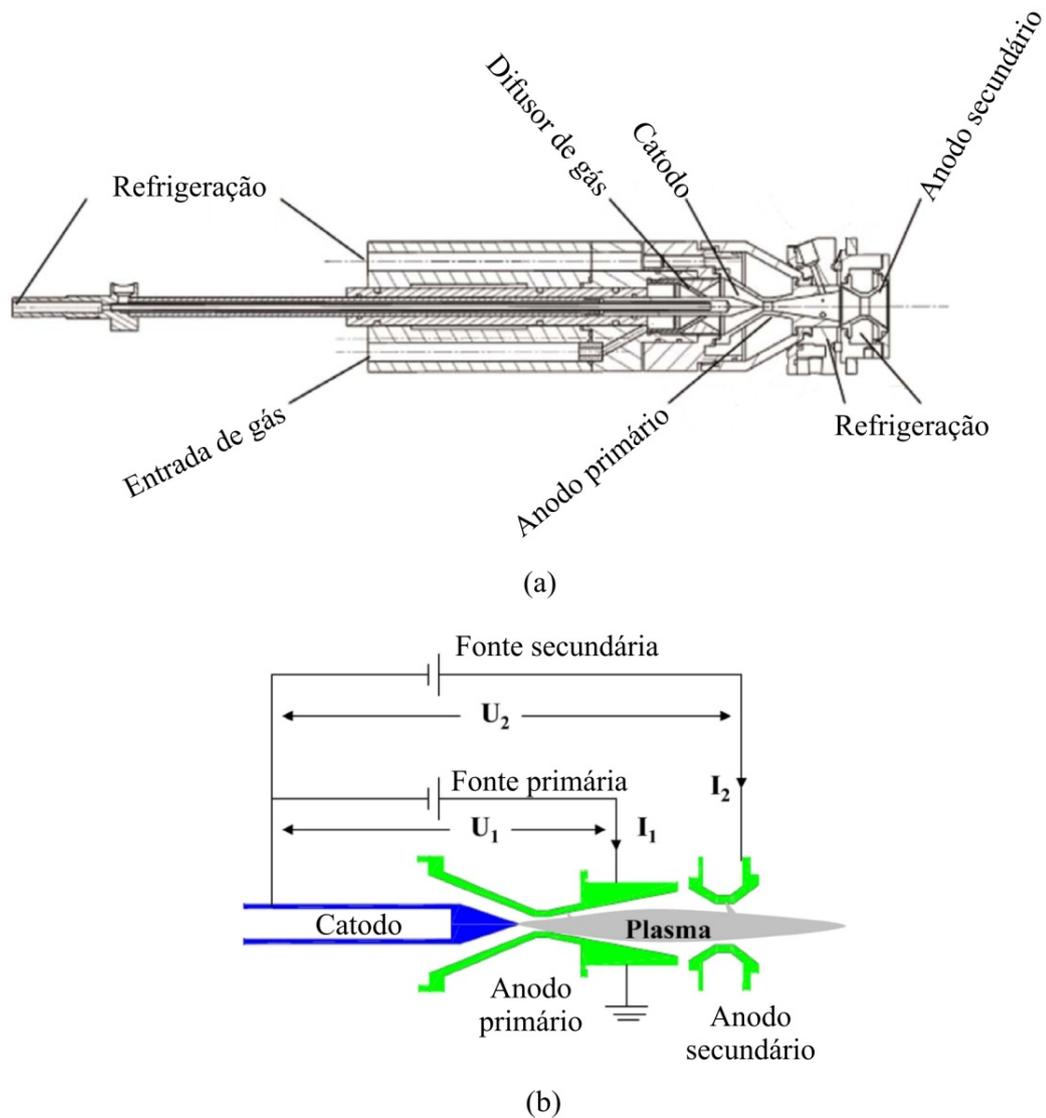
A **Figura 2.16** apresenta um desenho esquemático de um sistema híbrido de plasma não-transferido, o qual compreende em uma tocha de plasma de arco transferido com anodo externo em forma de câmara isolado eletricamente em relação ao catodo da tocha de plasma de arco transferido. A utilização do anodo externo à tocha permite a formação de dois arcos elétricos, um direto e um indireto (BROWNING, 1986).



**Figura 2.16.** Representação esquemática de uma tocha híbrida de plasma com arco não-transferido (BROWNING, 1986).

Outro tipo de tocha de plasma híbrida é apresentado pelo desenho esquemático da **Figura 2.17a**. Esta tocha é formada, principalmente, por dois anodos cilíndricos em forma de câmara e um catodo coaxial com uma de sua extremidade cônica. Estes eletrodos são

eletricamente isolados entre si através de anéis cerâmicos e são refrigerados com água. Esta tocha é alimentada por duas fontes de potência trifásicas idênticas, onde uma delas é conectada entre o catodo e o anodo primário e a outra é conectada ao mesmo catodo e ao anodo secundário, como indicado na **Figura 2.17b**. O gás argônio, nitrogênio e mistura dos mesmos foram utilizados na tocha para formar o jato de plasma. A construção e a caracterização desta tocha são bem apresentadas através da literatura (TU, CHÉRON, *et al.*, 2007; TU, YU, *et al.*, 2008).

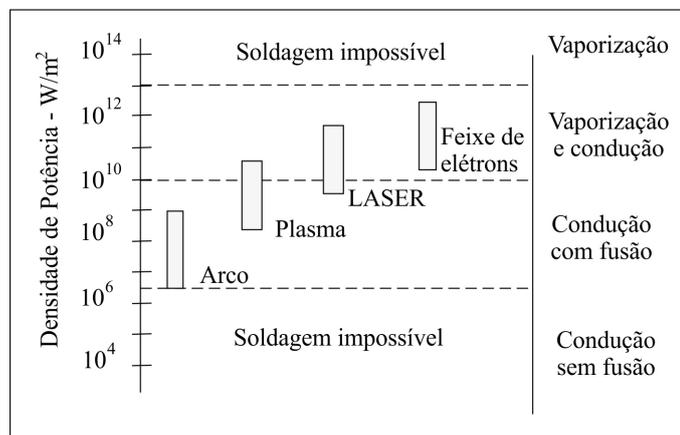


**Figura 2.17.** (a) Configuração de uma tocha de plasma com duplo anodo e (b) conexões elétricas características (TU, CHÉRON, *et al.*, 2008).

## 2.4 Processos Industriais Envolvendo Plasmas

Uma das características mais importantes da utilização de plasmas em processos industriais está relacionada às altas potência ou densidades de energias. Por exemplo, têm-se os arcos elétricos com corrente contínua ou as “tochas” de plasmas de RF indutiva, nos quais a potência pode atingir níveis na faixa de poucos kW até a faixa de dezenas de MW, onde a temperatura do plasma pode variar entre 5.000 e 30.000 K, dependendo das condições de operação e geometria do bocal. Tais plasmas estão dentro ou próximo do equilíbrio termodinâmico ou térmico, sendo utilizados para processos térmicos de plasma, os quais são capazes de fundir ou até vaporizar a maior parte de materiais, e são utilizado industrialmente para soldagem, corte, aspensão térmica, fornos a arco, e outras aplicações de processamento de materiais que exigem altas temperaturas (ROTH, 1995).

A **Figura 2.18** apresenta as faixas de potências em função de alguns processos utilizados na soldagem por fusão, onde no limite inferior desta faixa, a densidade de energia é insuficiente para aquecer a região próxima da área de contato até a sua fusão antes que o calor se difunda para o restante da peça. Neste caso, a fonte permite apenas o aquecimento de toda a peça sem ser capaz de promover a sua fusão localizada (este é o caso, por exemplo, de um maçarico de aquecimento ou uma manta térmica que, embora possam gerar uma quantidade apreciável de calor, este é transferido para a peça através de uma área de contato relativamente grande). No limite superior, o calor é fornecido de forma tão concentrada que causa uma vaporização do material na região de contato em poucos microssegundos, antes mesmo da fusão ou de um aquecimento apreciável de outras partes da peça. Têm-se, neste caso, condições mais favoráveis ao corte do que à soldagem.

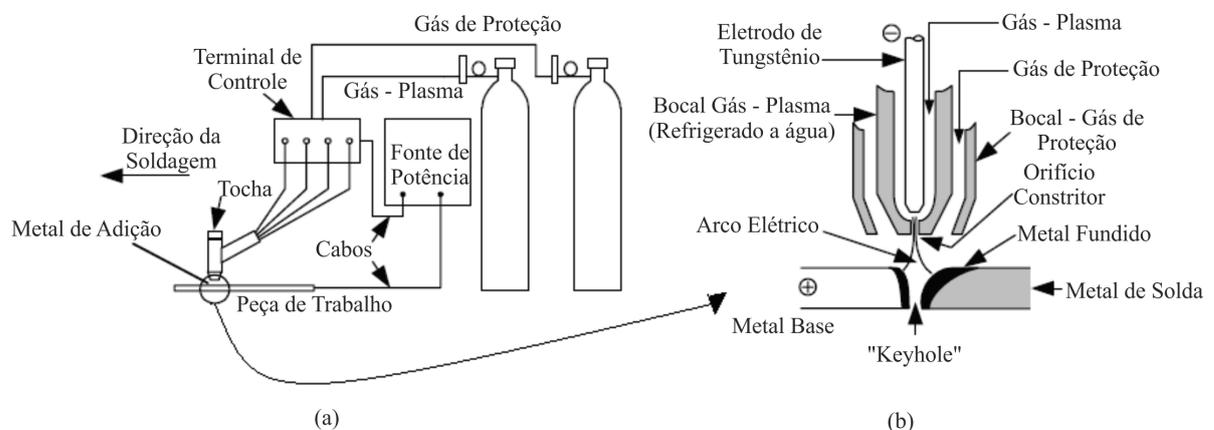


**Figura 2.18.** Escala de potências específicas (LANCASTER, 1986).

A seguir são apresentados alguns dos processos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, os quais utilizam os princípios da tecnologia do plasma, tais como: soldagem por plasma – PAW (“Plasma Arc Welding”), corte plasma e endurecimento superficial à plasma

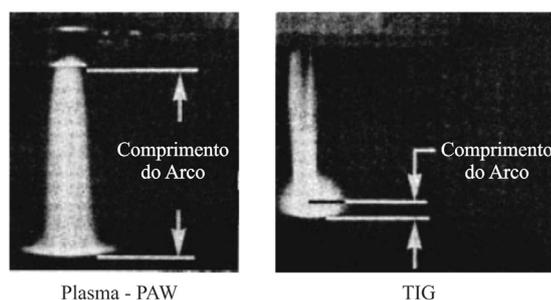
#### 2.4.1 Soldagem e Corte Plasma

O processo de soldagem PAW (“Plasma Arc Welding”) é similar ao processo TIG (“Tungsten Arc Welding”) e aos propulsores eletrotérmicos – “Arcjets”. O sistema desse processo é constituído por um eletrodo refratário não consumível e é geralmente conectado ao polo negativo de uma fonte de característica corrente constante (“tombante”). Circundando o eletrodo encontram-se dois bocais concêntricos, onde flui um gás geralmente inerte (argônio). O arco elétrico é iniciado por uma fonte de alta frequência entre o eletrodo e a peça (plasma transferido) ou entre o eletrodo e o bocal (plasma não-transferido). O gás é eletricamente aquecido e ionizado ao passar pela descarga elétrica no orifício e emerge como um jato de plasma, efeito característico dos propulsores eletrotérmicos. As temperaturas muito altas são governadas pelo aumento das descargas de correntes devido à constrição do arco e o gás do bocal externo, pela intensidade do campo magnético e pelas forças de Lorentz. Essas temperaturas são da ordem de 25.000 K (MACHADO, 1996; KOU, 2002). A **Figura 2.19** mostra o desenho esquemático dos equipamentos que constituem o processo de soldagem por plasma com detalhamento da região onde ocorre a soldagem.



**Figura 2.19.** Processo de soldagem por Plasma: (a) equipamentos e (b) região ampliada de onde ocorre a soldagem por “keyholing” (KOU, 2002).

A soldagem por plasma apresenta uma concentração maior de calor do que o processo TIG e, portanto, permite maiores velocidades de soldagem, ZAC reduzida, menor gasto de material de adição e menores distorções. Como a coluna de plasma é relativamente rígida e cilíndrica, a distância entre o bocal e a peça pode ser maior, facilitando a visualização da região de solda pelo operador. A **Figura 2.20** mostra a comparação dos arcos elétricos formados para os processos de soldagem TIG e PAW.



**Figura 2.20.** Comparação dos arcos elétricos formados nos processos PAW e TIG (AWS, 1991).

Outra vantagem reside no fato do eletrodo de tungstênio nunca entrar em contato com a peça, minimizando a chance de contaminação da solda. Normalmente, este processo é limitado a materiais com espessura inferior a 25 mm (KOU, 2002).

O corte Plasma utiliza os mesmos princípios da soldagem PAW. O arco sofre constrição, forma o plasma (gás altamente ionizado) e funde a peça, sendo que o próprio remove o material fundido por arraste ou com um gás auxiliar. Entretanto, o corte realizado com este dispositivo se dá por fusão, sendo possível obter pequenas extensões da ZAC; baixa deformação e alta qualidade (MACHADO, 1996).

#### 2.4.2 *Endurecimento Superficial*

Os processos de endurecimento superficial visam o aumento da dureza (ou outras propriedades mecânicas) de uma região específica de um componente. Normalmente, essa região sofre algum tipo de empenho localizado. O empenho mais comum é o desgaste abrasivo. Então, torna-se importante um aumento de resistência ao desgaste da região por meio de um endurecimento localizado, conservando as características originais do núcleo do

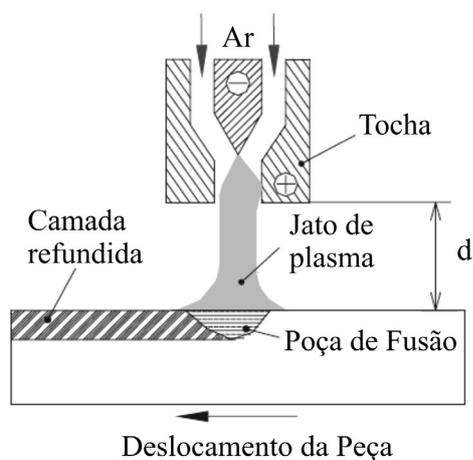
componente (VERÁSTEGUI, 2007; PAN *et al.*, 2005; CHIAVERINI, 2002; METALS HANDBOOK, 1990).

Existem diversos processos de endurecimento superficial, onde os principais processos são: encruamento por conformação mecânica a frio; tratamentos de eletrodeposição ou aspersão térmica; têmpera superficial; e tratamentos termoquímicos (cementação, nitretação, etc.). Os processos de tratamentos termoquímicos e têmperas superficiais são aqueles que aumentam a dureza superficial dos materiais pelas mudanças parciais da composição química e/ou termomecânicas originais. Os processos usuais de têmpera superficial podem ser classificados de acordo com o método de aquecimento, tais como: têmpera por chama; têmpera por indução; têmpera por feixe eletrônico; têmpera por laser e têmpera por jato de plasma (CHIAVERINI, 2002; PAN, *et al.*, 2005; VERÁSTEGUI, 2007).

Na têmpera por chama, o aquecimento é realizado através de uma chama de oxiacetileno e o resfriamento é realizado por um jato de água em forma de borrifo, produzindo um endurecimento superficial até a profundidade desejada. Desse modo, é possível utilizar aços de menor custo, nos quais se consegue obter maior resistência superficial ao desgaste. A têmpera por indução caracteriza-se pelo aquecimento da peça pelo calor gerado por indução eletromagnética, isto é, um indutor ou uma bobina induz um fluxo de corrente elétrica na peça que, por efeito joule, provoca o aquecimento na mesma. O resfriamento, normalmente, é realizado através de um jato de água. Um dos principais limitadores desse processo é a forma da peça, pois, algumas dessas formas dificultam que ela seja aquecida uniformemente. O processo de têmpera por feixe de elétrons é caracterizado por um feixe eletrônico dirigido para a superfície da peça que penetra rapidamente na sua superfície. Esses elétrons perdem rapidamente a sua energia e essa energia perdida é transformada em calor, que permite atingir a temperatura de austenitização a certa profundidade. O resfriamento necessário ocorre através de um processo de autorresfriamento, dependendo da condutibilidade térmica do material. Contudo, assim como no laser, o processo exige equipamentos sofisticados. A têmpera por LASER consiste em aplicar um feixe de luz concentrada sobre a superfície da peça a ser temperada. A energia do laser deve gerar calor suficiente para, no mínimo, austenitizar a superfície da peça e, também, um rápido resfriamento deve ser atingido para a realização da têmpera. O rápido resfriamento é atingido através das altas velocidades empregadas para mover o feixe de LASER sobre a superfície da peça (KRAUSS, 1980; METALS HANDBOOK, 1990; CHIAVERINI, 2002).

Os jatos de plasma utilizados para endurecimento superficial (têmpera por jato de plasma) proporcionam fluxos de gás com elevada temperatura, geralmente, com densidade de potência de, aproximadamente,  $10^8 \text{ W/m}^2$ . Com este jato de plasma é possível elevar ao ponto de fusão ou vaporização quase todos os materiais sólidos. Neste processo, a eficiência térmica pode ser muito maior e o custo muito menor quando comparado com o processo por feixe LASER. A têmpera por plasma pode ser por arco elétrico transferido ou não-transferido, onde, no primeiro, a peça de trabalho é o anodo e, geralmente, movimenta-se em relação ao catodo da tocha. As principais variáveis que influenciam na uniformidade e resultados do tratamento no processo a arco elétrico transferido são: intensidade de corrente elétrica; distância do catodo ao anodo (peça de trabalho); velocidade de deslocamento da tocha ou da peça; e tipo de material a ser processado (PAN, *et al.*, 2005; CHEN, YANG e LI, 2009).

A **Figura 2.21** apresenta o desenho esquemático do processo de endurecimento superficial por plasma não-transferido. Neste processo o jato de plasma serve como fonte de calor para aquecer e/ou fundir a superfície da peça a ser tratada termicamente. O jato de plasma pode ser turbulento ou laminar. No jato de plasma turbulento, o gradiente de temperatura, geralmente, excede  $200 \text{ K/mm}$  na região de alta temperatura quando considerado um fluxo de plasma constante, porém uma grande amplitude na flutuação de energia (acima de 50% do valor médio) pode gerar na superfície da peça certas discontinuidades (irregularidade na região fundida). O jato de plasma laminar apresenta baixa flutuação de energia, a qual resulta em menor mistura com a atmosfera circundante, e apresenta um baixo gradiente de temperatura com uma longa região de alta temperatura que reduz a oxidação do material processado (PAN, MENG, *et al.*, 2005; CHEN, YANG e LI, 2009).



**Figura 2.21.** Desenho esquemático do processo de têmpera por jato de plasma não-transferido (PAN, MENG, *et al.*, 2005).

## 2.5 Métodos para Caracterização do Jato de Plasma

O estudo experimental do jato de plasma é realizado principalmente de forma indireta, uma vez que as condições no jato de plasma são extremamente agressivas e métodos diretos tendem a perturbar de forma significativa as condições do jato. Como métodos diretos pode-se citar, por exemplo, a utilização de sondas eletrostáticas para medir o campo elétrico no interior do jato ou de pequenas partículas para a observação do fluxo de gases pelo arraste das mesmas. Existe um número enorme de técnicas indiretas que podem ser utilizadas para o estudo do jato de plasma, tais como: espectroscopia óptica, a qual consiste na análise da variação da intensidade da radiação eletromagnética emitida pelo jato de plasma em função do comprimento de onda; análise de sinais; análise por imagens – fotografia/cinematografia; interferometria; calorimetria; análise de efeitos gerados pelo arco elétrico formador do jato de plasma sobre os eletrodos (erosão, pressão, contaminação por gases, etc.), os quais podem ser utilizados para obtenção de dados (mecanismo de emissão de elétrons, fluxo de massa, etc.) (MODENESI, 2011).

### 2.5.1 Análise de Sinais Elétricos

Consiste na aquisição e análise dos sinais, de tensão e de intensidade de corrente elétrica, gerados pelo jato de plasma. Esta é uma técnica relativamente simples e comumente utilizada, inclusive, em operações de produção para controle de qualidade. Por outro lado, uma análise mais elaborada da variação dinâmica dos sinais elétricos pode fornecer dados importantes sobre o jato de plasma, por exemplo, a instabilidade do jato de plasma e os modos de operação dos arcos elétricos.

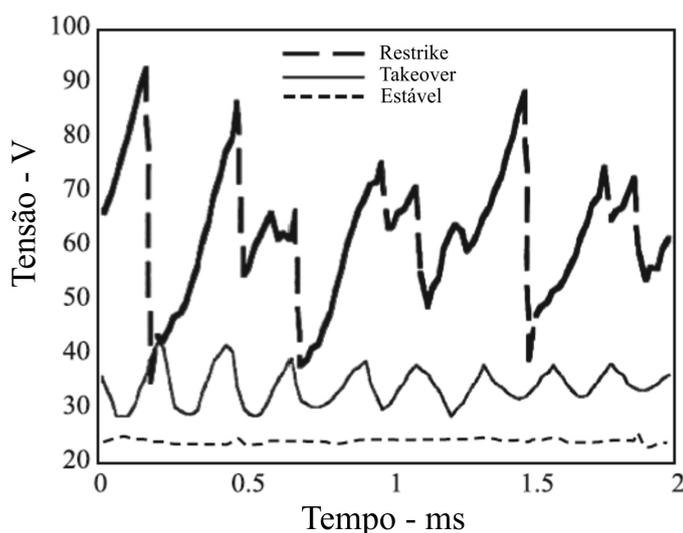
Os modos de operação de um arco elétrico são caracterizados da seguinte forma (TRELLES, CHAZELAS, *et al.*, 2009):

- “Steady” é caracterizado pela pequena flutuação de tensão elétrica e fixação do arco elétrico em um ponto. Este modo não é desejado devido à rápida erosão do anodo.
- “Takeover” é caracterizado por uma flutuação semi-periódica da tensão, a qual corresponde a um movimento do arco elétrico também semi-periódico. O espectro do sinal de tensão apresenta várias frequências dominantes. Este modo

é o mais desejado, pois uma adequada distribuição de calor ocorre sobre o anodo e produz uma flutuação do arco bem definida.

- “Restrike” é caracterizado pela alta instabilidade, onde é quase impossível determinar o movimento do arco elétrico e a larga amplitude de flutuação da tensão é quase caótica. Um arco elétrico atuando neste modo torna-se muito instável e relativamente indescritível.

A **Figura 2.22** apresenta um gráfico da tensão em função do tempo com os diferentes modos de operação do arco plasma não-transferido, sendo o modo “Restrike” – 100 A, 12/40 l/min de Ar/He; modo “Takeover” – 500 A, 20/40 l/min de Ar/He; e o modo “Estável” – 900 A, 60 l/min de Ar (MODENESI, 2011; WUA e PAN, 2011).



**Figura 2.22.** Gráfico da tensão em função do tempo apresentando os modos básicos de operação de um arco plasma não-transferido. (WUA e PAN, 2011).

Para uma determinada tocha de plasma, os modos de operação do arco podem ser alterados com mudanças nos parâmetros de operação, isto é, aumentando o fluxo de gás e diminuindo corrente elétrica total (aumentando o número de entalpia), o modo de operação muda de “steady” para “takeover” e finalmente para “restrike”.

Dispositivos de medição com tempos de resposta extremamente rápidos são utilizados para adquirir os sinais. Atualmente, a aquisição destes sinais é feita principalmente através de dispositivos digitais. Existem diferentes tipos destes sistemas incluindo osciloscópios digitais,

sistemas embutidos em um dado equipamento, dispositivos que se comunicam com computadores por “portas” e cartões (placas) A/D (analógico/digital) colocados dentro de computadores e controlados por um programa (“software”) específico. Estes dispositivos competem favoravelmente com sistemas analógicos em termos de custo e desempenho e têm a grande vantagem de permitir a análise e manipulação direta dos dados gerados por programas. Estes sistemas são formados, em geral, pelos seguintes elementos: transdutores (sensores), dispositivos para o condicionamento dos sinais gerados pelos sensores, um dispositivo (“hardware”) para aquisição digital de dados, um sistema de processamento de dados (por exemplo, um microcomputador) e programas para o controle da aquisição e análise dos dados (MODENESI, 2011).

### *2.5.2 Distribuição de Temperatura através de câmara CCD*

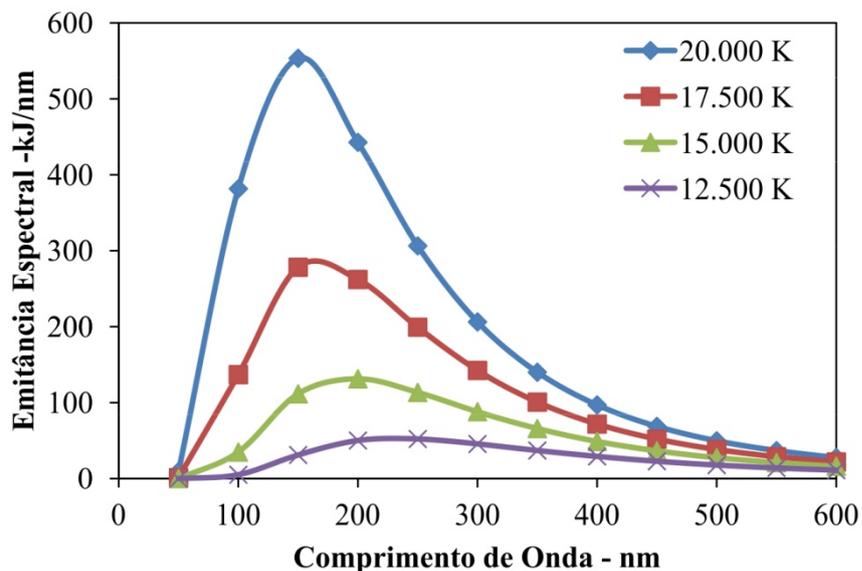
A medida de temperatura em jatos de plasma ou arcos elétricos não é possível através de métodos que utilizam contato físico (por exemplo, a medida de temperatura com termopares), pois os valores das temperaturas dos jatos de plasmas ou arcos elétricos ultrapassam os valores aceitáveis pelos sensores de temperatura utilizados nestes métodos. Então, os instrumentos desenvolvidos para medir temperaturas muito elevadas empregam sensores de radiação de uma forma ou de outra. Radiação é emissão de energia pela matéria e seu transporte não exige a presença de qualquer meio material. Com relação à natureza deste transporte, a Mecânica Quântica prevê que a radiação pode ser dual, isto é, pode ser tratada como onda (propagação de ondas eletromagnéticas) e, ao mesmo tempo, como partícula (propagação de matéria, as partículas denominadas de fótons). De qualquer modo, radiação térmica é a energia emitida por um corpo pelo fato de sua temperatura estar acima do zero absoluto, na qual podem ser atribuídas as propriedades típicas de uma onda, ou seja, a frequência  $\nu$  e o comprimento de onda  $\lambda$  (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; LANDES, 2006; HUANG, LIU e SONG, 2007; YAN e LI, 2010; LIU, 2010).

A medida de radiação térmica e, conseqüentemente, a medida de temperatura, é baseada na emissão de radiação de um corpo negro, o qual é considerado um radiador térmico ideal, isto é, toda radiação incidente no corpo é absorvida e, para uma dada temperatura, o máximo possível de radiação é emitida. A emitância espectral de um corpo negro é dada pela lei de

Planck, segundo a **Equação 2.12** (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; IZARRA e M., 2010):

$$E_R(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left[ e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1 \right]} \quad (2.12)$$

onde,  $E_R$  é a emitância espectral (intensidade de radiação hemisférica),  $h$  é constante Planck,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação e  $T$  é a temperatura absoluta do corpo. A **Figura 2.23** mostra o gráfico da intensidade de radiação em função do comprimento de onda para diferentes temperaturas, onde são observadas as seguintes características: a radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda; em qualquer comprimento de onda, a intensidade da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura; as curvas exibem picos (intensidades máximas de radiação) em certos comprimentos de onda, sendo que estes picos se deslocam para esquerda (comprimento de ondas menores) à medida que a temperatura aumenta; e a área sob a curva é a emitância total do corpo negro, que aumenta rapidamente com o aumento da temperatura (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; YAN e LI, 2010).



**Figura 2.23.** Emitância espectral (intensidade de radiação hemisférica) de um corpo negro para quatro temperaturas (SEGOVIA, *et al.*, 1998).

A lei de Wien do deslocamento (isto é, o deslocamento do pico da distribuição da emitância espectral) permite calcular o comprimento de onda correspondente à intensidade de radiação máxima,  $\lambda_{max}$ , para uma dada temperatura. Esta lei pode ser apresentada pela **Equação 2.13** (SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; IZARRA e M., 2010):

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{constante} \quad (2.13)$$

O deslocamento destes pontos de máximo explica a mudança na cor de um corpo ao ser aquecido. Primeiramente o corpo se torna vermelho escuro, depois laranja e então branco.

A radiação térmica total emitida pelo corpo negro é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann (**Equação 2.14**) (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; IZARRA e M., 2010):

$$E_t = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.14)$$

onde,  $\varepsilon$  é a emissividade do corpo (para o corpo negro  $\varepsilon = 1$  e para os corpos reais  $\varepsilon < 1$ ),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta do corpo.

Embora o corpo negro seja uma idealização física e matemática, é possível construir radiadores reais cujo comportamento se aproxima muito do comportamento do corpo negro. Estas fontes de radiação são necessárias para a calibração de medidores de temperatura por radiação.

Existem vários métodos para se medir a radiação térmica emitida por um corpo. Nestes métodos, a radiação emitida é focada sobre algum tipo de detector de radiação que produz um sinal elétrico. Estes detectores podem ser classificados como detectores de fótons (CCD – “Charged Coupled Device”), os quais são utilizados em câmaras digitais ou térmicas. O CCD é um dispositivo foto-eletrônico feito de silício, constituído de inúmeros elementos sensíveis à luz, os pixels. Um CCD de uma câmera fotográfica atual com 6 Megapixels possui uma matriz de elementos óticos individuais, em um arranjo quadrado, de 2.440 x 2.440 que somam 6 Megapixels. Por exemplo, cada pixel pode ter em torno de 0,08 mm. Este dispositivo armazena uma carga eletrônica através da absorção de radiação e, com isso, pode ser caracterizado como um dispositivo eletrônico de memória, ativado pela luz (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; YAN e LI, 2010).

As imagens de jatos de plasmas ou arcos elétricos adquiridos com dispositivos CCD podem ser convertidas em matrizes com elementos óticos individuais, onde o nível de cinza (“gray level”) é calibrado e relacionado com a emissão de radiação e, conseqüentemente, com a temperatura dos jatos de plasma ou arcos elétricos. Com isso, é possível, com boa aproximação, determinar as elevadas temperaturas dos jatos de plasma (RENIER, MERIAUDEAU, *et al.*, 1996; SEGOVIA, PACHECO, *et al.*, 1998; XU, GAO e WU, 2005; LANDES, 2006; HUANG, LIU e SONG, 2007; CHUMAK, KAVKA e HRABOVSKÝ, 2008; LIU, 2010; YAN e LI, 2010).

### 2.5.3 Projeto e Análise de Experimentos

Existem várias técnicas desenvolvidas para projetos e análise de experimentos, onde as mais utilizadas são: Planejamento fatorial completo; Planejamento fatorial fracionado; Taguchi – engenharia robusta; e Metodologia da superfície de resposta (MONTGOMERY, 1991; BENYOUNIS e OLABI, 2008).

O planejamento fatorial completo tem aplicações em processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas (experimentos) não demanda alto tempo e custo. Esta técnica permite varredura completa da região de estudo, pois utiliza todas as variáveis e respectivos níveis (BENYOUNIS e OLABI, 2008).

Em processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada ou para corridas de experimentos que demandam maior tempo e custo utiliza-se técnica de fatorial fracionada, a qual permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de experimentos. Esta técnica não permite uma varredura completa da região (BENYOUNIS e OLABI, 2008).

A técnica de engenharia robusta – Taguchi permite uma análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos. Esta técnica, geralmente, dá uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis. Então, esta técnica pode ser utilizada em processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio do comportamento e em processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo (BENYOUNIS e OLABI, 2008).

Por fim, a técnica MSR (Metodologia da Superfície de Resposta) permite a verificação de variações intermediárias do processo, mas podem apresentar erros na extrapolação dos

níveis +2 e -2, pois são realizadas poucas corridas nestes níveis. Esta técnica é, geralmente, aplicada na otimização de processos bem conhecidos e que possuem baixa dispersão (BENYOUNIS e OLABI, 2008).

Para analisar estatisticamente a significância das variáveis (parâmetros) sobre uma determinada resposta do processo, utiliza-se a técnica de análise da variância (ANOVA). Esta técnica consiste, basicamente, em um teste de hipótese. A partir dos valores de variância pode-se determinar a probabilidade de erro ao aceitar uma hipótese, a qual é definida por  $P_{valor}$ . Este índice é obtido através de uma distribuição de variância em um determinado nível de significância, onde, geralmente, são utilizados níveis de significância acima de 90% (MONTGOMERY, 1991; LAKSHMINARAYANAN e BALASUBRAMANIAN, 2008).

### 3 MATERIAIS E METODOLOGIAS

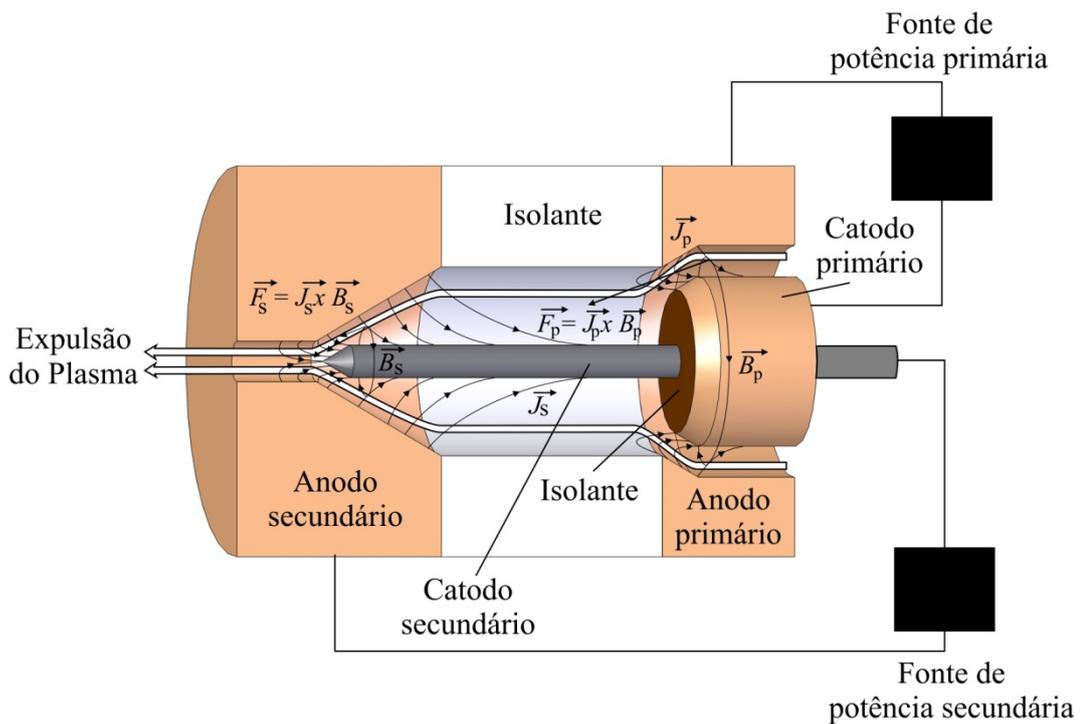
Os materiais e metodologias são apresentados em três etapas, isto é, a primeira descreve o projeto e funcionamento da tocha de plasma híbrida desenvolvida no LS&TC, a segunda apresenta os métodos e materiais para a caracterização da mesma e, por fim, a terceira parte descreve a aplicação da tocha em processos de fabricação, tais como: soldagem, corte térmico e endurecimento superficial. Nesta última parte, o objetivo do trabalho não foi de otimizar os processos com o novo dispositivo e sim verificar a possibilidade do mesmo realizar soldagem, corte e endurecimento superficial.

#### 3.1 Tocha de Plasma Híbrida

##### 3.1.1 Princípio de Funcionamento da Tocha de Plasma Híbrida

A tocha de plasma híbrida caracteriza-se pela formação simultânea de dois arcos plasmas em apenas um dispositivo, os quais geram um jato de plasma com elevada densidade de energia. Esta tocha é proveniente da união de dois processos geradores de plasma: Plasma Não-Transferido e Propulsor Magnetoplasmadinâmico. Esta tocha possui uma geometria coaxial constituída por dois catodos, primário e secundário, e dois anodos cilíndricos em forma de câmara, os quais são isolados eletricamente. Inicialmente, um gás é injetado através de orifícios gerando um fluxo laminar na câmara, onde o gás é aquecido e ionizado através da passagem pela descarga elétrica entre os eletrodos (catodo primário e anodo primário), gerada por uma fonte primária de energia com dispositivo de alta frequência. Através deste plasma (gás ionizado) surge uma densidade de corrente radial, a qual atravessa o gás em direção ao catodo primário. Esta corrente no catodo primário gera um campo magnético induzido circunferencial, o qual interage com a densidade de corrente aparecendo uma força eletromagnética, chamada de “força de Lorentz” ( $\vec{J}_P \times \vec{B}_P$ ), a qual acelera as partículas formando uma câmara de plasma. Sendo o plasma um condutor elétrico, outra descarga elétrica é gerada por uma fonte secundária de energia entre o catodo secundário e anodo secundário na câmara. Uma segunda densidade de corrente radial surge atravessando o plasma em direção ao catodo secundário, onde esta corrente no catodo secundário também gera um campo magnético induzido circunferencial, que, por sua vez, interage com a densidade de corrente secundária aparecendo outra força eletromagnética ( $\vec{J}_S \times \vec{B}_S$ ), a qual ioniza e acelera

ainda mais as partículas do jato de plasma provenientes da primeira ionização, e é também responsável pela expulsão do jato de plasma para fora da câmara. Portanto, neste sistema o gás é acelerado duas vezes, isto é, primeiro pela força eletromagnética entre os eletrodos primários e, sequencialmente, pela força eletromagnética resultante entre os eletrodos secundários. Um esquema da tocha de plasma híbrida com a representação das linhas de densidade de corrente elétrica é mostrado na **Figura 3.1**.

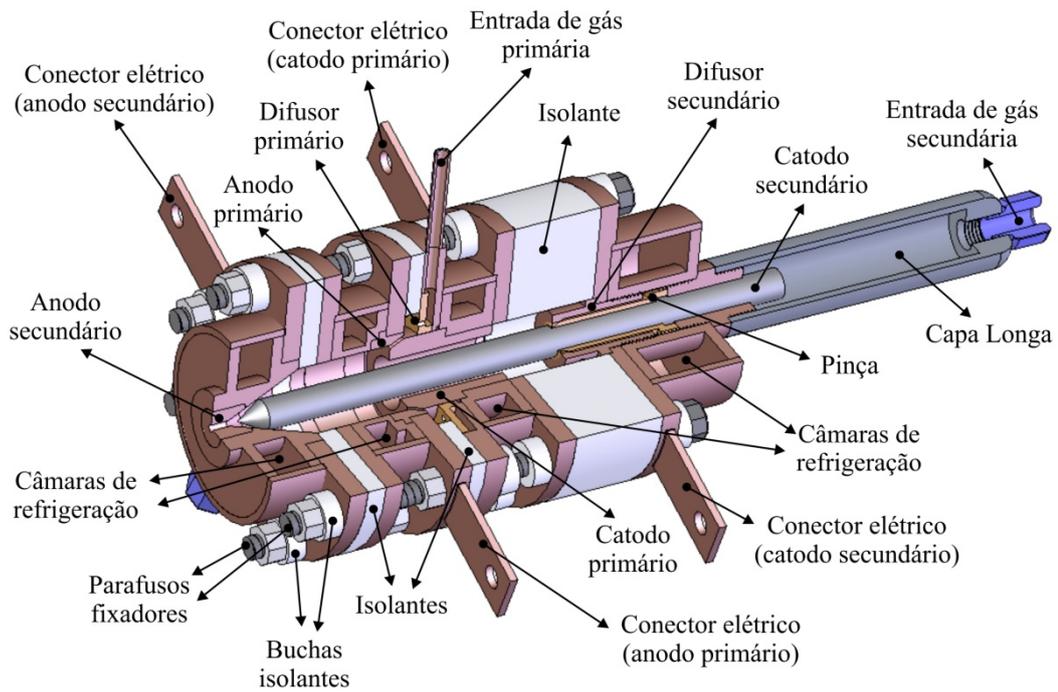


**Figura 3.1.** Desenho esquemático da tocha de plasma híbrida.

### 3.1.2 Estrutura da Tocha de Plasma Híbrida

A **Figura 3.2** mostra um desenho esquemático da configuração inicial da tocha de plasma híbrida projetada nesta tese. Este dispositivo é composto principalmente por dois catodos, primário e secundário, sendo o secundário um eletrodo de tungstênio puro com 8 mm de diâmetro, 150 mm de comprimento e extremidade cônica de 60°; e o primário um eletrodo confeccionado em cobre em forma de anel; por dois anodos, primário e secundário, ambos confeccionados em cobre e em forma de câmara. Os eletrodos são fixados em câmaras de refrigeração à água e isolados eletricamente entre si através isolantes (fibras refratárias produzidas a partir de sílica e alumina de alto grau de pureza – Placas Kaowool HS board) usinados em forma de flanges. As dimensões foram determinadas de acordo com a literatura

sobre transferência térmica, eletromagnetismo e, principalmente, dinâmica dos fluidos em tocha de plasma. As câmaras de refrigeração são encaixadas em flanges de cobre, os quais são fixados com parafusos e porcas. Buchas de teflon são utilizadas para evitar descargas elétricas entre os parafusos e os flanges. O gás de trabalho é adicionado à tocha através de duas entradas (primária e secundária). A entrada de gás secundária foi criada, principalmente, para ajudar na refrigeração do catodo secundário.



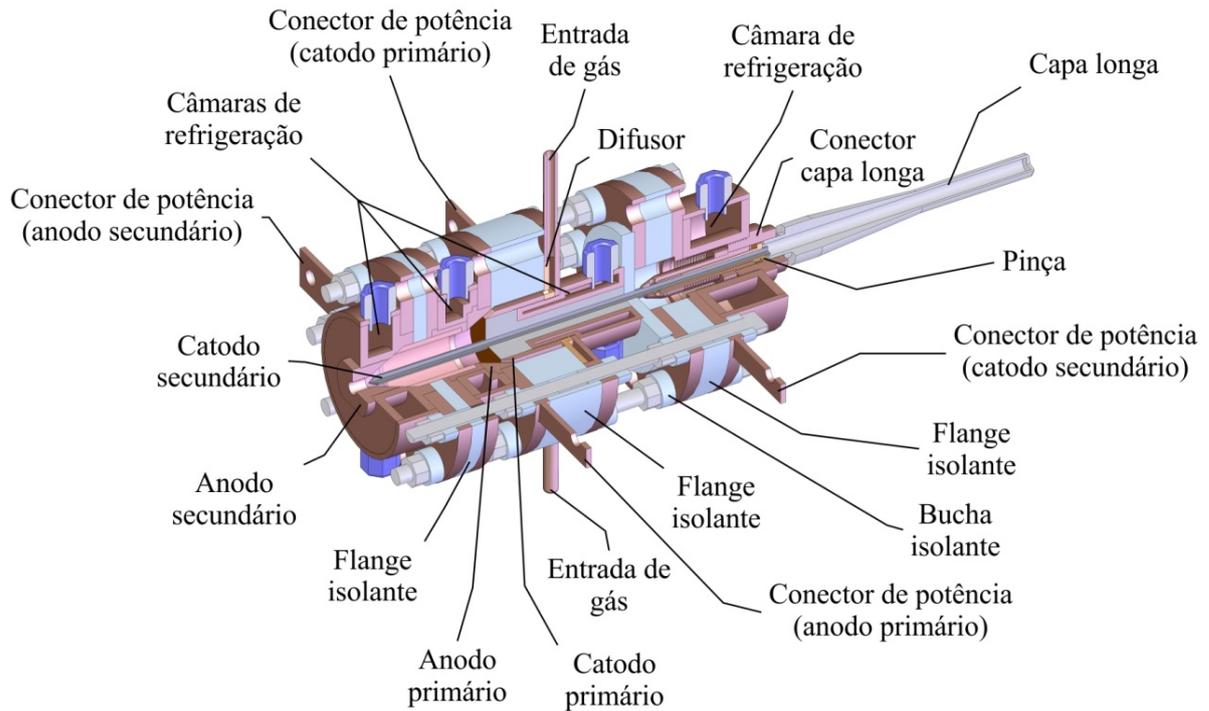
**Figura 3.2.** Desenho esquemático inicial da tocha de plasma híbrida desenvolvida no LS&TC.

A **Figura 3.3(a)** apresenta as peças constituintes da tocha de plasma híbrida para a configuração inicial e a **Figura 3.3(b)** mostra a tocha de plasma híbrida montada.



**Figura 3.3.** (a) Peças constituintes da tocha de plasma híbrida e (b) a mesma montada.

Devido aos problemas de isolamento elétrico e falta de refrigeração apresentados no projeto inicial da tocha, algumas modificações foram realizadas, as quais podem ser vistas através da **Figura 3.4** que apresenta a tocha de plasma híbrida modificada. O desenho esquemático desta tocha, em maior escala, pode ser observado no **ANEXO A** através da **Figura A.36**.

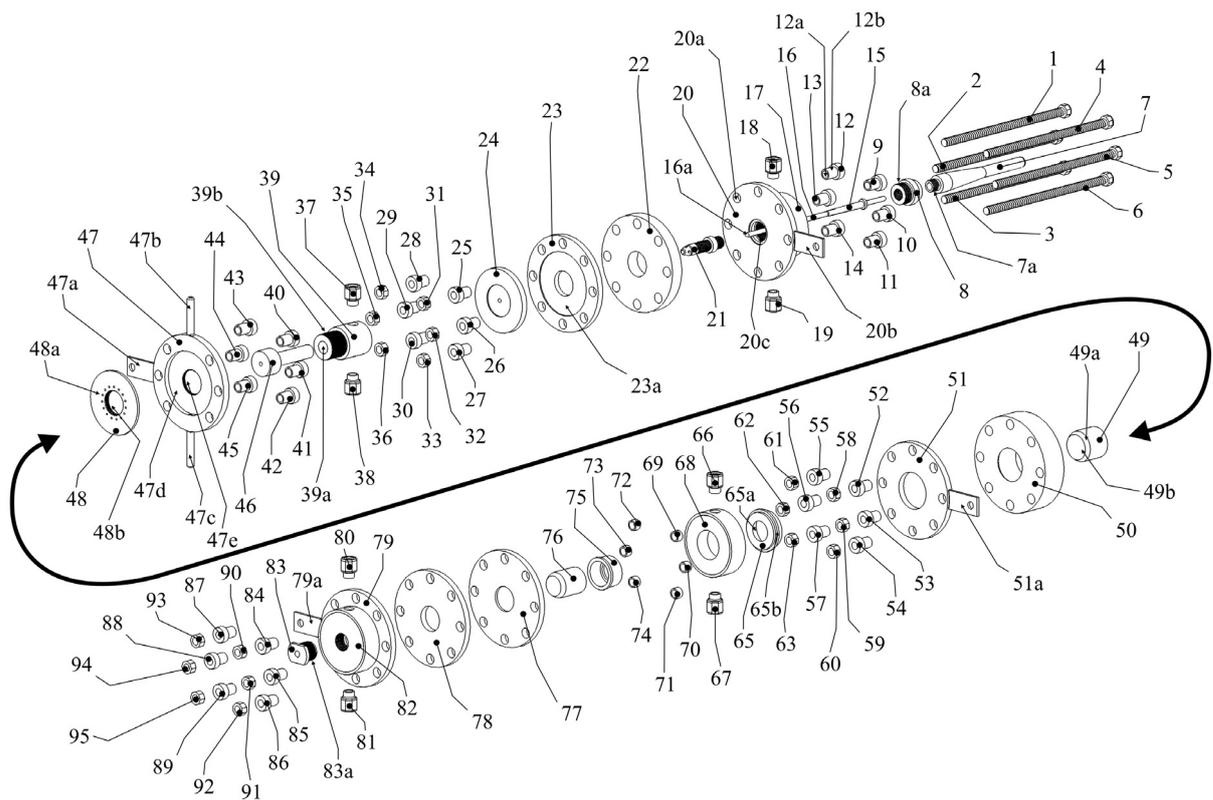


**Figura 3.4.** Tocha de plasma híbrida modificada.

Nesta nova configuração, o catodo primário foi modificado para um eletrodo em forma de câmara com íntimo contato com a água, aumentando a refrigeração do mesmo. A câmara de refrigeração do anodo secundário e o anodo secundário foram alterados melhorando a refrigeração no eletrodo. Também, para melhorar a refrigeração dos eletrodos, duas entradas de água foram adicionadas, sendo uma para a primeira e segunda câmara de refrigeração e outra para a terceira e quarta câmara de refrigeração, diferentemente do projeto inicial que havia apenas uma entrada de água para as quatro câmaras de refrigeração. O catodo secundário de tungstênio puro com 8 mm de diâmetro foi substituído por um eletrodo AWS E WTh-2 de 3,2 mm de diâmetro. As deficiências no isolamento elétrico foram resolvidas através das seguintes modificações: todos os parafusos foram isolados dos flanges de cobre com buchas de teflon; um bocal cerâmico (mesmo utilizado no processo de soldagem TIG) foi

anexado entre os eletrodos (anodo primário e anodo secundário) para evitar a instabilidade do arco elétrico primário; a entrada de gás primária foi excluída devido à necessidade de isolar o catodo primário do catodo secundário, sendo este isolamento feito com uma bucha de material cerâmico.

Os componentes constituintes da tocha de plasma híbrida modificada são apresentados através da **Figura 3.5** que apresenta uma vista explodida da tocha.



**Figura 3.5.** Vista explodida da tocha de plasma híbrida modificada.

Os componentes da tocha de plasma híbrida são compreendidos em:

- Parafusos (1) (2) (3) (4) (5) (6) e porcas (31) (32) (33) (34) (35) (36) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (90) (91) (92) (93) (94) (95) utilizados para unir os conjuntos de peças da tocha. Estes parafusos e porcas foram constituídos de material metálico. Também, foram testados parafusos e porcas constituídos de material isolante (exemplo, teflon), os quais dispensam a utilização de buchas isolantes, porém a rigidez do corpo da tocha ficou comprometida.

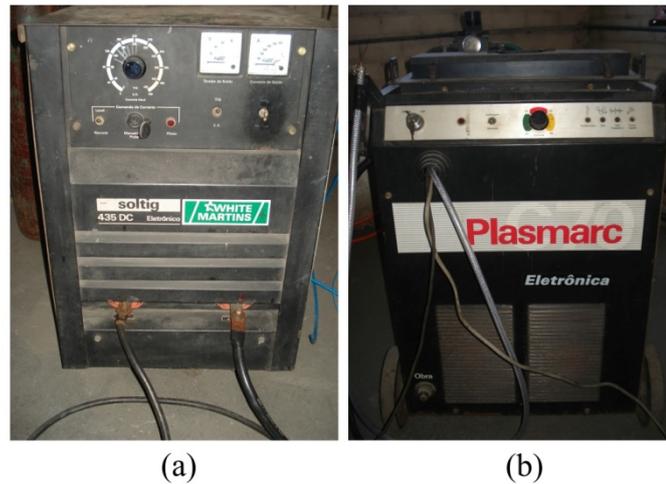
- Buchas isolantes (9) (10) (11) (12) (13) (14) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (84) (85) (86) (87) (88) (89), onde, para cada uma, a parte interna (12a) é inserida junto ao parafuso (1) e a parte externa (12b) é inserida no orifício (20a) do flange fixador. Sendo os parafusos e as porcas condutores elétricos, as buchas isolantes tem a função de isolar eletricamente os mesmos em relação ao corpo da tocha, pois sem o uso das buchas ocorreria curto circuito entre as partes. Os materiais utilizados para a confecção das buchas foram de característica isolante elétrico, teflon.
- Flanges isolantes (22) (50) (78) são utilizados para isolar eletricamente os conjuntos de peças contendo os eletrodos. Estes flanges foram confeccionados com fibras cerâmicas.
- Flanges fixadores (20) (23) (47) (51) (77) (79) contendo haste para conexão elétrica (20b) (47a) (51a) (79a), tubos para entrada de gás (47b) (47c) e câmara de gás (47d). Alguns flanges possuem pequenos rebaixos (23a) em seu corpo para encaixe de outros componentes. O material utilizado na construção dos flanges fixadores foi o cobre.
- Câmaras de refrigeração (17) (39) (68) (82), sendo uma para cada eletrodo. Cada câmara possui uma entrada e uma saída para algum tipo de líquido refrigerante, nas quais foram conectados engates rápidos para mangueiras. Estas câmaras foram confeccionadas em cobre. Cada câmara possui meios específicos para conexão dos eletrodos.
- Catodo secundário (16) caracteriza-se por ser um eletrodo coaxial de tungstênio (AWS E WTh-2) com 150 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro e com extremidade cônica (16a) de 60°.
- Componentes fixadores do catodo secundário, tais como: capa longa (7), corpo fixador (8), pinça (15) e difusor TIG (21).
- Catodo primário (49) caracterizado por ser um eletrodo cilíndrico em forma de câmara com chanfro cônico (49a) de 60° em uma de suas extremidades. Este eletrodo foi conectado à câmara de refrigeração através de uma rosca (49b) no seu interior. O material utilizado para a fabricação deste eletrodo foi o cobre.
- Isolante cerâmico entre os catodos (46) em forma de bucha, o qual tem a função de evitar arcos elétricos entre o catodo primário (49) e o catodo secundário (16) dentro da câmara de refrigeração (39a). Este isolante é constituído de fibra cerâmica.

- Difusor (48) capaz de tornar o fluxo de gás laminar dentro da câmara de ionização. Este difusor (48) possui orifícios circulares (48a) que tornam o fluxo de gás laminar. Em uma das extremidades, forma-se uma câmara de gás quando o difusor (48) é unido ao flange fixador (47) com rebaixo em forma de câmara (47d). O difusor foi constituído de cobre.
- Anodo primário (65) caracterizado por ser um corpo cilíndrico em forma de anel com alguns relevos (65b) em sua estrutura para ser encaixado entre a câmara de refrigeração (68) e o flange fixador (51). Este eletrodo possui, em uma de suas extremidades, um chanfro interno (65a) de 60°. O material utilizado na construção deste eletrodo foi o cobre.
- Bocal cerâmico (76) em forma de câmara com a função de conduzir o gás ionizado pelos eletrodos primários até os eletrodos secundários e de evitar que o arco elétrico primário se expanda até o anodo secundário. O material utilizado para a construção deste bocal foi um bocal cerâmico convencional para soldagem TIG.
- Anodo Secundário (83), caracterizado por ser um corpo coaxial em forma de câmara, possui uma rosca externa (83a) para ser fixado à câmara de refrigeração (82). Este eletrodo foi confeccionado em cobre

Os componentes descritos anteriormente são apresentados com suas respectivas dimensões no **ANEXO A**, onde uma breve descrição de montagem da tocha também é apresentada.

### *3.1.3 Fontes de Potências*

Duas fontes de potências de característica corrente constante (“tombante”) foram utilizadas para o acionamento da tocha de plasma híbrida. Estas fontes são distintas quanto aos intervalos de intensidade de corrente elétrica e aplicação, isto é, a fonte de potência primária possui um intervalo de corrente elétrica de 0 – 70 A, um gerador de alta frequência e é utilizada pelo LS&TC para o processo de corte térmico a plasma; e a fonte de potência secundária tem intervalo de corrente elétrica de 0 – 400 A e é utilizada para o processo de soldagem TIG. A **Figura 3.6** mostra as duas fontes de potências utilizadas.



**Figura 3.6.** Fontes de energia utilizadas para o acionamento da tocha de plasma híbrida, (a) fonte secundária e (b) fonte primária.

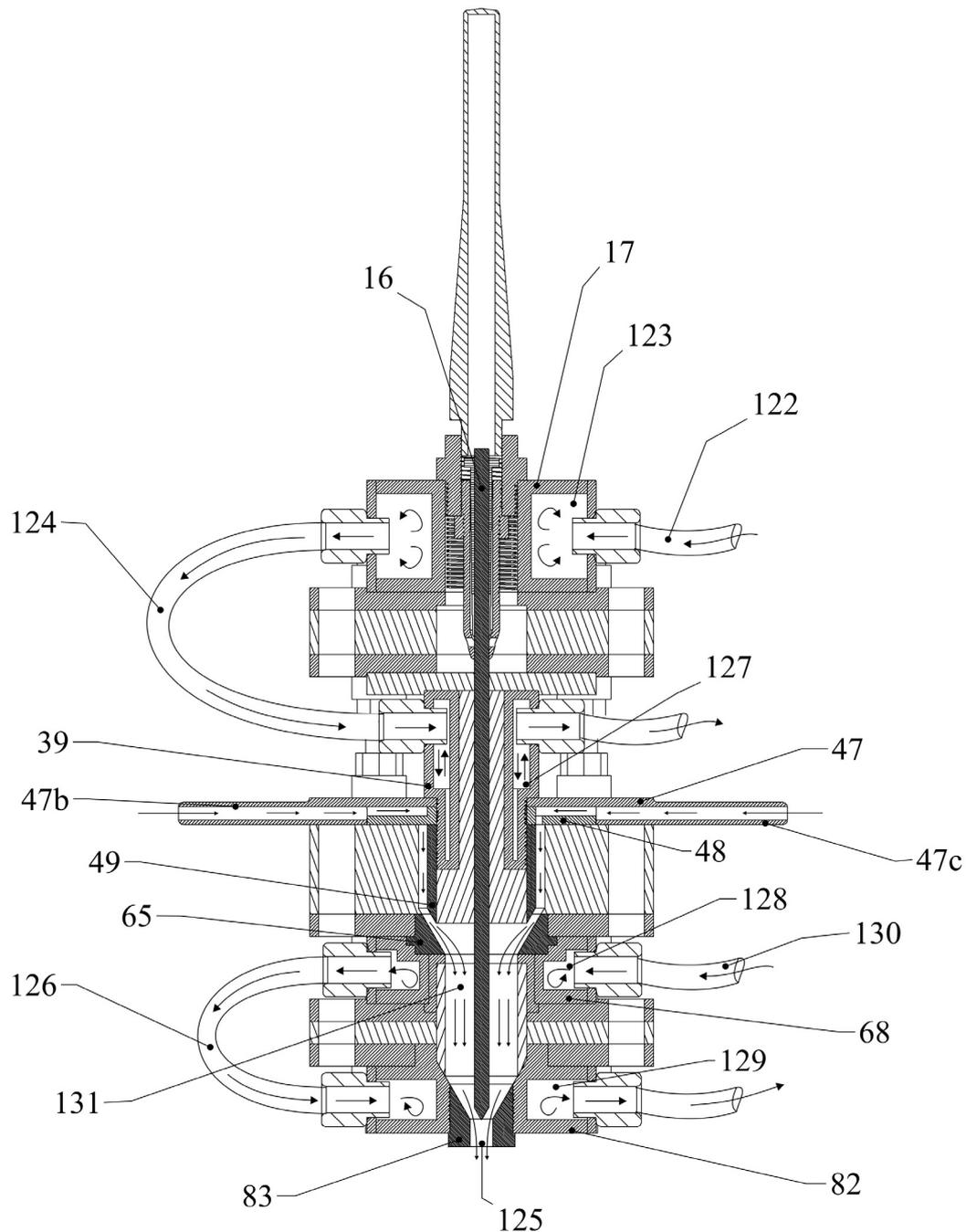
### *3.1.4 Sistema de Injeção de Gás e Líquido de Arrefecimento*

O sistema de injeção do gás na tocha de plasma é composto por um cilindro de argônio com válvula de diafragma e fluxímetro que controlam e medem o fluxo de entrada de gás dentro da tocha de plasma. O gás argônio foi admitido diretamente na câmara de descarga da tocha pelas entradas de gás indicadas na **Figura 3.4**. Com este sistema, vazões de até 25 l/min de argônio foram possíveis.

A refrigeração dos eletrodos foi realizada através de câmaras refrigerantes, as quais foram alimentadas por água pela rede externa do LS&TC formando um sistema aberto de refrigeração.

A **Figura 3.7** apresenta uma secção transversal da tocha de plasma híbrida, onde são indicados os fluxos do líquido refrigerante e do gás. O líquido refrigerante foi adicionado simultaneamente por duas entradas (122) (130) das câmaras de refrigeração. A passagem de líquido refrigerante de uma câmara de refrigeração para outra foi realizada por meios de mangueiras (124) (126), isto é, uma mangueira (124) liga a câmara de refrigeração (17) do catodo secundário (16) à câmara de refrigeração (39) do catodo primário (49) e uma mangueira (126) liga a câmara de refrigeração (68) do anodo primário (65) à câmara de refrigeração (82) do anodo secundário (83). O líquido refrigerante circula dentro das câmaras (123) (127) (128) (129) retirando o calor proveniente da condução térmica entre os eletrodos (16) (49) (65) (83) e as câmaras de refrigeração (17) (39) (68) (82). O gás é admitido na tocha

por duas entradas (47b) (47c) em forma de tubo, as quais são localizadas no flange fixador (47) do catodo primário. Este gás passa por um difusor (48), o qual torna o fluxo de gás laminar dentro da câmara de ionização (131), e sai pelo orifício (125) do anodo secundário (83). As duas entradas de gás, na mesma câmara, têm a função de distribuir homogeneamente o gás.

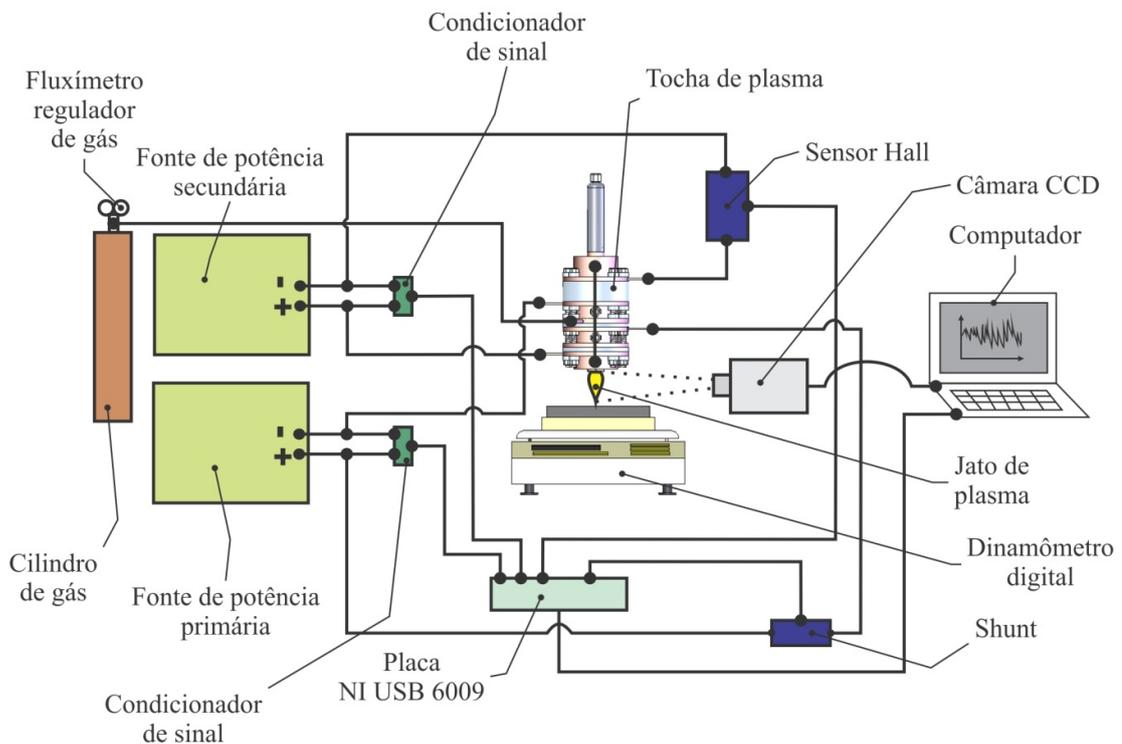


**Figura 3.7.** Seção transversal da tocha híbrida geradora de plasma com a representação esquemática dos fluxos de gás e líquido refrigerante.

### 3.2 Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida

A caracterização da tocha consiste em determinar os efeitos dos parâmetros de funcionamento da tocha de plasma híbrida (vazão do gás e intensidade de corrente – primária e secundária) sobre as seguintes variáveis físicas: força propulsora resultante do jato de plasma expulso para fora da câmara; os comprimentos e aparência de jatos de plasma gerado pela tocha; a distribuição de temperatura no jato de plasma expulso para fora da câmara; e as curvas características de tensão e corrente.

A **Figura 3.8** apresenta o aparato experimental utilizado para a caracterização da tocha de plasma híbrida. Este aparato é constituído pelos seguintes equipamentos: fontes de potências (primária e secundária); tocha de plasma híbrida; shunt e sensor Hall para medir a intensidade de corrente elétrica da fonte primária e secundária, respectivamente; condicionadores de sinais para aquisição de tensão entre os eletrodos; dinamômetro eletrônico para medir a força propulsora resultante do jato de plasma expulso para fora da câmara; fluxímetro para regular e determinar a vazão de gás (argônio) na tocha; placa de aquisição de dados NI USB 6009; câmara CCD para adquirir as imagens do jato de plasma; computador; e softwares.



**Figura 3.8.** Aparato experimental para caracterização da Tocha de Plasma Híbrida.

Os experimentos para a caracterização do dispositivo foram conduzidos de acordo com um projeto de experimentos, o qual foi elaborado através do método estatístico fatorial completo. Este projeto possui três variáveis (parâmetros) com quatro níveis (valores). As variáveis são apresentadas na **Tabela 3.1** com seus respectivos níveis. Os níveis para cada variável foram escolhidos através de experimentos prévios, os quais foram realizados, principalmente, para determinar as limitações do funcionamento da tocha de plasma híbrida. Os níveis de vazão do gás foram determinados de acordo com as limitações do fluxímetro utilizado, o qual funciona em um intervalo de vazão de 5 l/min até 25 l/min.

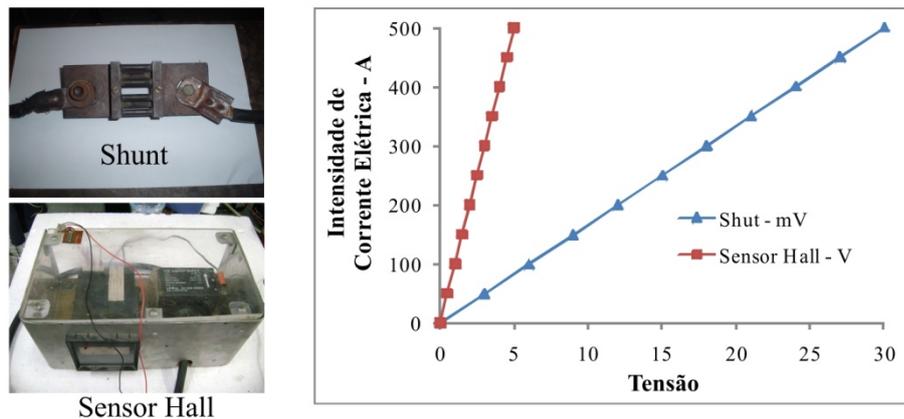
**Tabela 3.1.** Variáveis (parâmetros) com respectivos níveis para os experimentos realizados na caracterização da Tocha de Plasma Híbrida

Nº	Variável	Unidade	Notação	Nível	Valor
1	Intensidade de corrente elétrica primária	A	$I_P$	1	30
				2	40
				3	50
				4	60
2	Intensidade de corrente elétrica secundária	A	$I_S$	1	100
				2	150
				3	200
				4	250
3	Vazão do gás (argônio)	l/min	$V_g$	1	7
				2	14
				3	20
				4	25

A ordem de execução dos experimentos foi aleatoriamente determinada para evitar erros sistemáticos. Também, três repetições dos experimentos foram feitas para diminuir o erro. As medidas de tensão, intensidade de corrente elétrica e aquisição de imagens foram realizadas simultaneamente, totalizando 192 experimentos. Para determinação da força propulsora resultante foram realizados mais 192 experimentos. Estes experimentos foram realizados conforme a matriz experimental apresentada no **ANEXO B**.

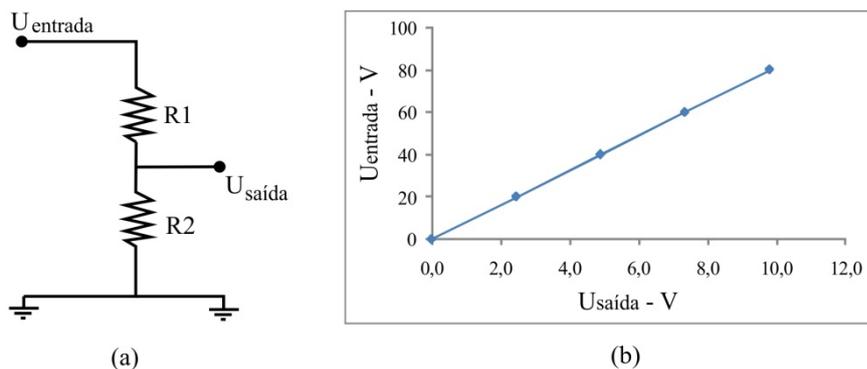
### 3.2.1 Determinação das Curvas Característica – $U \times I$

As intensidades de correntes elétricas foram medidas através de dois dispositivos, um shunt e um sensor Hall, os quais são apresentados pela **Figura 3.9** com suas curvas de calibração característica.



**Figura 3.9.** Sensores para medir a intensidade de corrente elétrica com gráfico de calibração dos mesmos (tensão no shunt em mV e tensão no Sensor Hall em V).

Dois condicionadores de sinais (divisores de tensão – **Figura 3.10(a)**), um para cada par de eletrodos, foram utilizados para medir a tensão entre os mesmos. Estes condicionadores de sinais foram utilizados porque os valores de tensão, entre os eletrodos quando as fontes de potência operam em circuito aberto ou fechado, ultrapassam os valores admitidos pela placa de aquisição. A curva característica de calibração do divisor de tensão é mostrada na **Figura 3.10(b)**.



**Figura 3.10.** (a) Circuito elétrico do divisor de tensão e (b) sua respectiva curva de calibração.

Todos os dados de intensidade de corrente elétrica e tensão foram adquiridos através de uma placa de aquisição NI USB 6009 com taxa de aquisição de 10 kHz e software Labview. Para aquisição destes dados, inicialmente, acionava-se os dois arcos elétricos (primário e

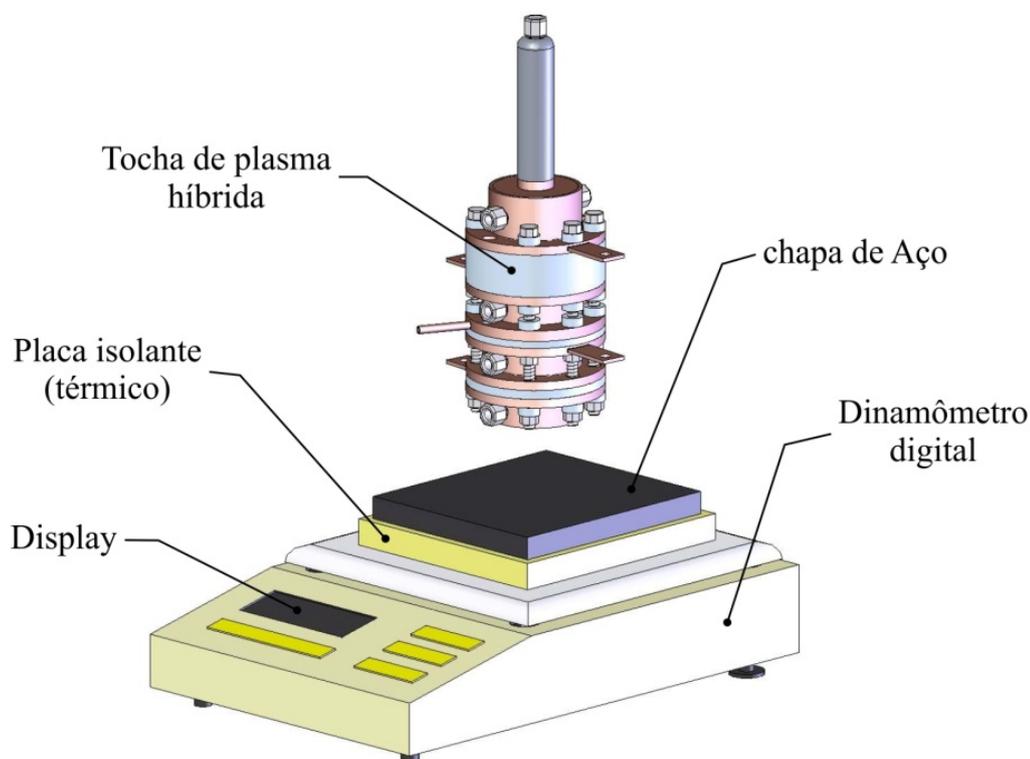
secundário), e, sequencialmente, esperava-se o desligamento automático da alta frequência (fonte primária) e a estabilização do jato de plasma. A estabilização do jato de plasma acontecia em poucos segundos. Para cada teste experimental, os dados foram coletados com intervalo de tempo de 20 segundos. A leitura e processamento dos dados também foram realizados através do software Labview. Os diagramas dos programas utilizados na aquisição, na leitura e no processamento de dados são apresentados no **ANEXO C**.

O processamento dos dados consistiu em determinar as amplitudes espectrais de potência dos sinais de tensão e corrente por meio da FFT (“Fast Fourier Transform”); determinar as medidas de tendências centrais (Média, RMS – “Root Mean Square”) e medidas de dispersão (variância, desvio padrão, etc.) dos dados; e determinar a influência dos variáveis (parâmetros) sobre a tensão entre os eletrodos através da análise de variância (ANOVA). A análise de variância foi aplicada sobre os valores de tensão RMS, onde foi considerada uma distribuição normal das amostras.

### *3.2.2 Determinação da Força Propulsora*

A **Figura 3.11** representa o aparato experimental utilizado para medir a força propulsora. Este aparato é formado por um dinamômetro eletrônico de precisão (Marte – Modelo AS5000) e a tocha de plasma híbrida rigidamente fixada através de um suporte de aço. Para evitar o aquecimento do dinamômetro eletrônico foi inserido sobre o mesmo um isolante térmico (fibra cerâmica) e uma chapa de aço com espessuras de 25 mm e 12,7 mm, respectivamente. A distância entre o bocal da tocha e a chapa de aço foi de 40 mm. O aparato experimental localizava-se em lugar fechado, tornando o sistema isolado de forças externas que poderiam afetar a estabilização do dinamômetro. Para cada teste experimental, inicialmente acionava-se o dispositivo, sem que o gás fosse ionizado, e media-se a força resultante do gás expulso para fora da câmara; posteriormente acionava-se o primeiro arco elétrico da tocha, ionizando o gás, e esperava-se de dois a três segundos para estabilizar o jato de plasma primário; e, sequencialmente, acionava-se o segundo arco elétrico, aumentando a ionização do gás, e media-se a força resultante do jato de plasma secundário, o qual se formava pela ionização do gás pelos dois arcos elétricos (primário e secundário). Para realizar as medidas esperava-se a estabilização do valor numérico no dinamômetro. A diferença entre as forças resultantes, do gás não ionizado e do jato de plasma secundário, multiplicada pela intensidade do campo gravitacional local fornece o valor aproximado, em Newtons, da força

propulsora resultante da tocha de plasma híbrida. Os efeitos dos parâmetros sob a força propulsora resultante da tocha de plasma híbrida foram determinados através da análise de variância (ANOVA).



**Figura 3.11.** Desenho esquemático do aparato experimental desenvolvido para medir a força propulsora fornecida pela tocha de plasma.

### 3.2.3 Comprimento do Jato de Plasma

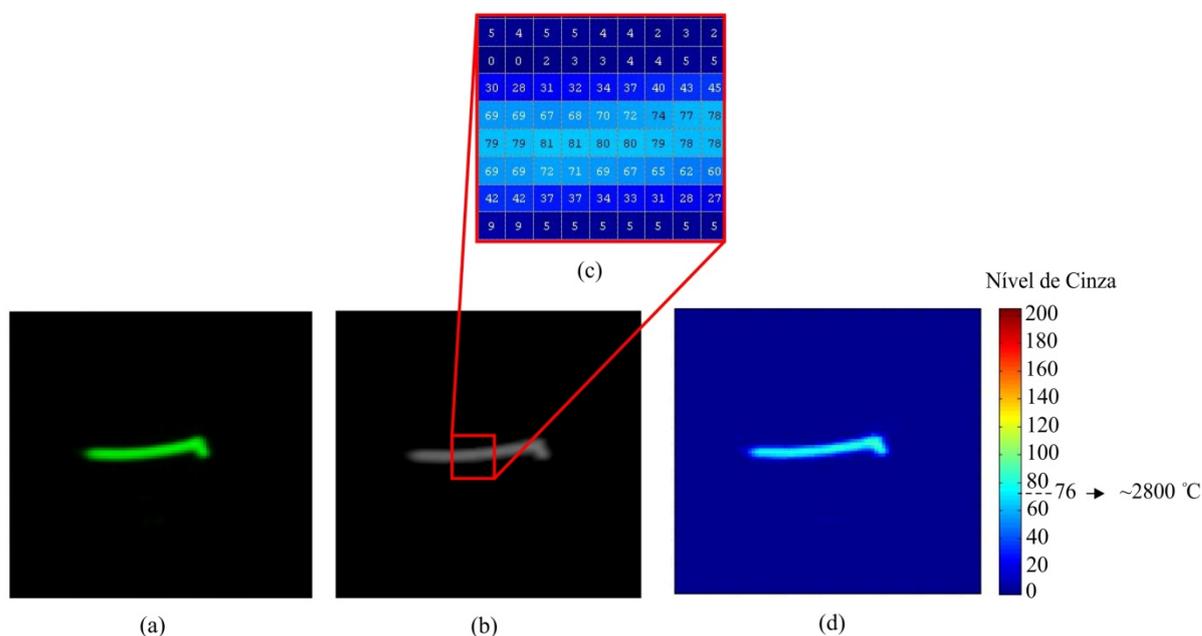
Os comprimentos dos jatos de plasma foram determinados através da análise de imagens, as quais foram adquiridas com uma máquina fotográfica digital. As imagens foram processadas através do software “imageJ” e os efeitos dos parâmetros sobre o comprimento do jato de plasma foram determinados através de uma análise de variância (ANOVA).

### 3.2.4 Distribuição de Temperatura do Jato de Plasma

As imagens do jato de plasma para determinação da distribuição de temperatura foram adquiridas através de uma câmara CCD com dois filtros AWS números 12 e 6 fixados em

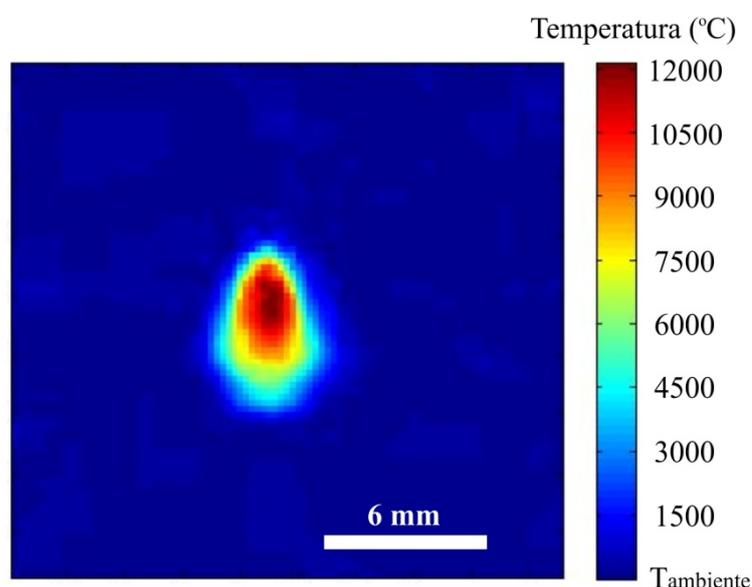
frente à lente. As imagens foram adquiridas conforme a matriz experimental do projeto de experimento descrito anteriormente.

Inicialmente, testes utilizando diferentes filtros foram realizados para calibração do instrumento de medida. Esta calibração consistiu em adquirir imagens de uma fonte de radiação com temperatura conhecida (filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente em funcionamento). Segundo o fabricante, a temperatura na superfície do filamento de tungstênio é de, aproximadamente, 2800 °C quando a lâmpada de 100 W de potência opera com tensão de 110 V. A **Figura 3.12** apresenta a sequência do processamento das imagens para determinar a distribuição de temperatura de um filamento de tungstênio. A **Figura 3.12(a)** mostra a imagem adquirida pela câmara CCD com filtros que, através de softwares, foi processada através da seguinte sequência: a imagem inicial foi transformada em uma imagem de 8 bits e em tons de cinza (**Figura 3.12(b)**); a imagem transformada foi convertida em uma matriz com elementos ópticos individuais (**Figura 3.12(c)**) e modo de cor “jet”, onde o nível de cinza (“gray level”) médio da superfície do filamento de tungstênio é relacionado com a emissão da radiação e com a temperatura.



**Figura 3.12.** Processamento de imagens utilizado para determinar a distribuição de temperatura. (a) Imagem coletada pela câmara CCD, (b) imagem processada, (c) matriz de elementos com níveis de cinza e (d) imagem final com nível de cinza correspondente a temperatura.

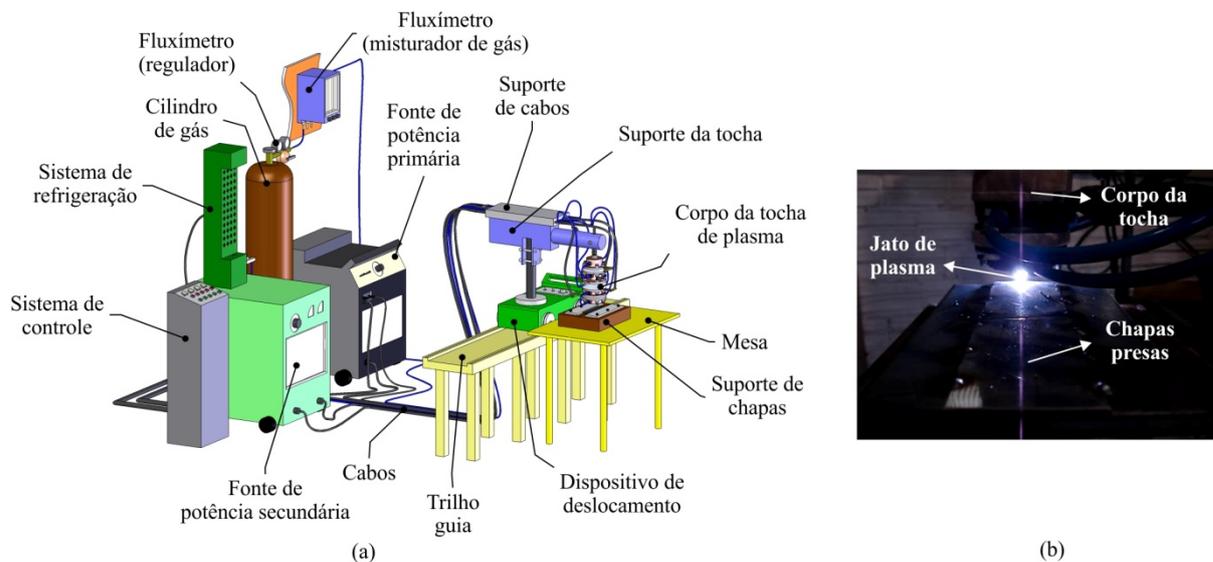
Após calibração do instrumento, testes foram realizados com diferentes fontes de radiação. Por exemplo, foi verificada a distribuição de temperatura de um arco elétrico TIG, o qual é mostrado pela **Figura 3.13**. Este arco elétrico estático foi gerado com intensidade de corrente elétrica de 100 A, vazão do gás argônio de 10 l/min e distância entre eletrodo e peça de 6 mm. Para este teste, as imagens foram registradas com uma câmara CCD com dois filtros AWS de números 14 e 6, pois, utilizando os filtros 12 e 6, os quais foram utilizados para determinar a distribuição de temperatura do jato de plasma, o nível de cinza saturava devido a radiação ser elevada, isto é, as imagens registradas apresentavam matrizes de elementos com níveis de cinza de 255 (limite máximo).



**Figura 3.13.** Distribuição de temperatura para um arco elétrico TIG.

### 3.3 Aplicação da Tocha de Plasma em Processos de Fabricação

A aplicação da tocha de plasma híbrida em processos de fabricação consiste em testar a possibilidade de realização de soldagem, de corte e de endurecimento superficial com a tocha. Para realização dos testes de aplicação da tocha foi utilizado um sistema de bancada com dispositivo de deslocamento. Esta bancada é constituída pelos seguintes equipamentos: fontes de potência; sistema de deslocamento; suportes para fixar a tocha e os cabos; cilindro de gás, reguladores de gás; sistema de controle, e outros. A **Figura 3.14(a)** mostra um esquema da bancada utilizada nos testes e a **Figura 3.14(b)** mostra a tocha de plasma híbrida em operação em um dos testes de soldagem.



**Figura 3.14.** (a) Bancada utilizada nos testes de soldagem, corte e endurecimento superficial. (b) Tocha funcionando em um dos testes de soldagem.

Os testes de soldagem foram realizados utilizando chapas de diferentes espessuras (0,7 mm à 6,35 mm) e materiais (SAE 1020 e AISI 304). As chapas foram fixadas e centralizadas de acordo com o jato de plasma exaustado para fora da câmara. Os parâmetros de soldagem utilizados foram os seguintes: distância entre o bocal e a peça foi de 5 mm; gás argônio injetado na câmara da tocha com vazões de 7 l/min à 25 l/min; intervalos de intensidade de corrente elétrica das fontes de potência primária e secundária de 30 A à 60 e 100 A à 250, respectivamente; velocidade de soldagem de 1,7 mm/s à 8,3 mm/s. O ângulo na ponta do catodo secundário foi de 60°. As distâncias entre os eletrodos primários e secundários foram, respectivamente, de 3 mm e 2 mm.

Os testes de corte com a tocha de plasma híbrida foram realizados usando chapas de diferentes espessuras (0,5 à 4 mm) e materiais (alumínio e vários tipos de aços). Gás argônio foi injetado na câmara do dispositivo com vazão acima de 20 l/min. A distância entre o bocal de saída do jato de plasma e a peça foi de 5 mm, diferentes velocidade de deslocamento da tocha e intensidades de corrente elétrica (fonte primária e secundária) foram aplicadas.

Os testes de endurecimento superficial com o dispositivo foram realizados utilizando peças cilíndricas de aço AISI 52100 com 15 mm de altura e 76,2 mm de diâmetro. A composição química do aço utilizado é apresentada através da **Tabela 3.2**. Os perfis de microdureza foram adquiridos através de um microdurômetro marca Shymadsu, modelo M-

92080, com carga de 50 g e tempo de 15 s. Estes perfis foram realizados na superfície da região tratada termicamente, onde a microdureza foi obtida em intervalos de 0,1 mm. A análise metalográfica foi realizada através de microscópio de luz marca Olympus modelo BX60M. O corpo de prova foi lixado e, sequencialmente, polido com alumina, sendo o ataque químico realizado com nital (concentração de 1%).

**Tabela 3.2.** Composição química do aço AISI 52100.

Tipo de aço	Elementos químicos (concentração)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
AISI 52100	0,93	0,24	0,31	0,014	0,01	1,39	0,14

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

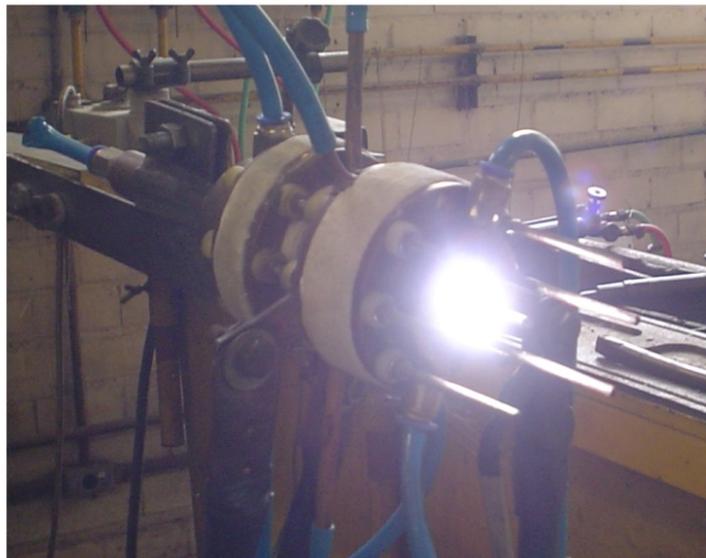
Os resultados são apresentados em três etapas. A primeira etapa consiste em apresentar os resultados obtidos nos experimentos iniciais de funcionamento da tocha de plasma híbrida, onde alguns problemas de projeto foram detectados e solucionados. A segunda etapa consiste em apresentar os resultados obtidos na caracterização da tocha de plasma híbrida quanto às curvas características de tensão e corrente; ao comprimento do jato de plasma; à distribuição de temperatura do jato de plasma expulso para fora da câmara; e quanto à força propulsora resultante do jato de plasma. Por fim, a terceira etapa consiste na apresentação dos resultados obtidos em soldagem, corte e endurecimento superficial com tocha de plasma híbrida.

### 4.1 Testes Iniciais com a Tocha

Os testes iniciais consistiram em analisar a funcionalidade da tocha de plasma híbrida, isto é, analisar o funcionamento da tocha quanto à formação dos arcos elétricos (primário e secundário) e jatos de plasmas, vazamentos de gás, isolamentos elétricos e térmicos, e outros.

Nos primeiros testes com a tocha de plasma foram constatados alguns problemas que ocasionaram o funcionamento da tocha em condições precárias. Primeiramente, foi verificado que ocorriam vazamentos de gás entre algumas conexões da tocha gerando uma instabilidade nos arcos elétricos. Este problema foi resolvido através da adição de silicone para alta temperatura entre as partes em que ocorriam vazamentos de gás.

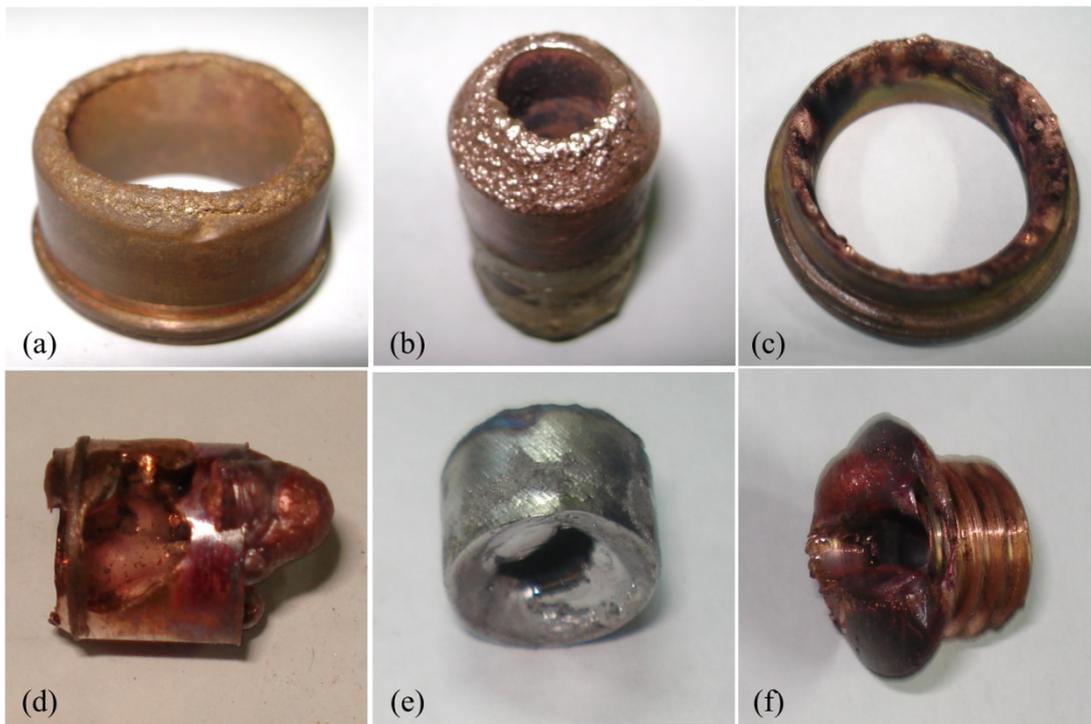
Em relação à formação dos arcos elétricos (primário e secundário) individualmente, ambos apresentaram um jato de plasma aparentemente estável. A **Figura 4.1** apresenta o jato de plasma obtido com a tocha de plasma híbrida parcialmente montada, isto é, o jato de plasma gerado pelo arco elétrico primário (arco não-transferido). Neste caso, foi observado que o ponto quente “spot” do arco elétrico formado entre o anodo primário e o catodo primário fazia movimentos aleatórios em relação aos eletrodos. Também, os jatos de plasma gerados pelo arco secundário apresentaram características semelhantes aos jatos obtidos por estudos anteriores com propulsores magnetoplasmadinâmicos (MACHADO e LERMEN, 2008).



**Figura 4.1.** Tocha de plasma híbrida funcionando com apenas o arco elétrico primário.

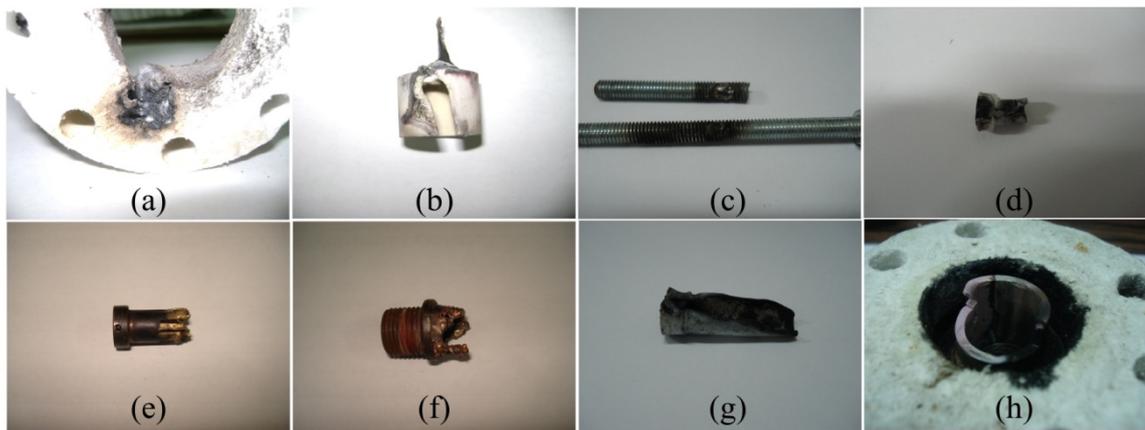
Outro problema constatado foi a falta de refrigeração do catodo primário e do anodo secundário, nos quais ocorriam um excessivo desgaste por erosão. A **Figura 4.2** apresenta alguns eletrodos utilizados e danificados devido à erosão. Para resolver este problema, optou-se pela construção de novos eletrodos. No caso do anodo secundário, inicialmente o eletrodo de cobre (**Figura 4.2(d)**) foi substituído por um eletrodo de tungstênio (**Figura 4.2(e)**) com as mesmas dimensões, porém os efeitos da falta de refrigeração persistiram. Então, o diâmetro interno da câmara de refrigeração foi aumentado, conseqüentemente, outro anodo secundário foi desenvolvido, onde a parede de cobre entre a água e o eletrodo foi diminuída aumentando a troca de calor entre os mesmos. A excessiva erosão do catodo primário foi eliminada através da construção de uma nova câmara de refrigeração (**Figura A.12**) e um novo catodo primário (**Figura A.13**), onde a troca de calor entre os mesmo aumentou devido ao maior contato.

A **Figura 4.2(f)** mostra o anodo secundário após um teste de limitação dos eletrodos, onde foram empregadas intensidades de corrente elétrica, nas fontes de energia primária e secundária, de 400 A e 60 A, respectivamente. A **Figura 4.2(c)** apresenta o anodo primário após todos os testes realizados com a tocha de plasma híbrida. O anodo primário e o catodo secundário foram os eletrodos que menos apresentaram sinais de erosão.



**Figura 4.2.** Eletrodos danificados pela erosão. (a) (b) Catodos primários, (c) anodo primário e (d) (e) (f) anodos secundários.

Também, alguns problemas de isolamento elétrico foram detectados quando a tocha de plasma híbrida operava com os arcos elétricos simultaneamente. Esta falta de isolamento elétrico gerava arcos elétricos indesejados entre flanges de cobre e eletrodos, flanges de cobre e parafusos fixadores, eletrodos e difusores, etc. Estes arcos elétricos indesejáveis acabavam danificando os componentes da tocha como: flanges isolantes, bocal cerâmico, parafusos fixadores, entre outros. Para evitar estes arcos elétricos foram realizadas as seguintes modificações no projeto inicial da tocha de plasma híbrida: a entrada de gás secundária foi eliminada; foi adicionado uma bucha cerâmica entre o catodo primário e o catodo secundário; buchas isolantes de nylon foram adicionadas em todos os contatos dos flanges com os parafusos; e foi adicionada uma câmara cerâmica (TIG) entre o anodo primário e o catodo secundário. Alguns componentes danificados pelas descargas elétricas podem ser visualizados pela **Figura 4.3**.



**Figura 4.3.** Componentes da tocha híbrida danificados por descargas elétricas. (a) flange isolante, (b) (h) bocais cerâmicos, (c) parafusos, (d) (g) buchas isolantes, (e) pinça e (f) difusor.

Portanto, algumas modificações no projeto inicial foram necessárias para obter um funcionamento estável da tocha de plasma híbrida. Estas modificações podem ser vistas através da **Figura 3.4** que apresenta a tocha de plasma híbrida modificada.

## 4.2 Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida

Os resultados experimentais (valores das variáveis físicas – respostas) para a caracterização da tocha de plasma híbrida são apresentados no **ANEXO B**. As análises de variância e as construções de gráficos foram realizadas de acordo com os resultados obtidos para cada resposta.

### 4.2.1 Força Propulsora

A **Tabela 4.1** apresenta os resultados da análise de variância, com nível de confiabilidade de 95%, para a força propulsora resultante. Através desta análise, observou-se que os valores de probabilidade P-valor foram menores que 0,05 e, conseqüentemente, pode-se dizer que todas as variáveis tiveram influência significativa sobre a força propulsora resultante. Também, as variáveis que tiveram maior influência sobre a força propulsora podem ser determinadas pelos valores de F, isto é, quanto maior o valor de F maior será a influência. Então, em ordem decrescente de influência sobre a força propulsora resultante, as

variáveis foram: a intensidade de corrente elétrica secundária, a vazão do gás e a intensidade de corrente elétrica primária.

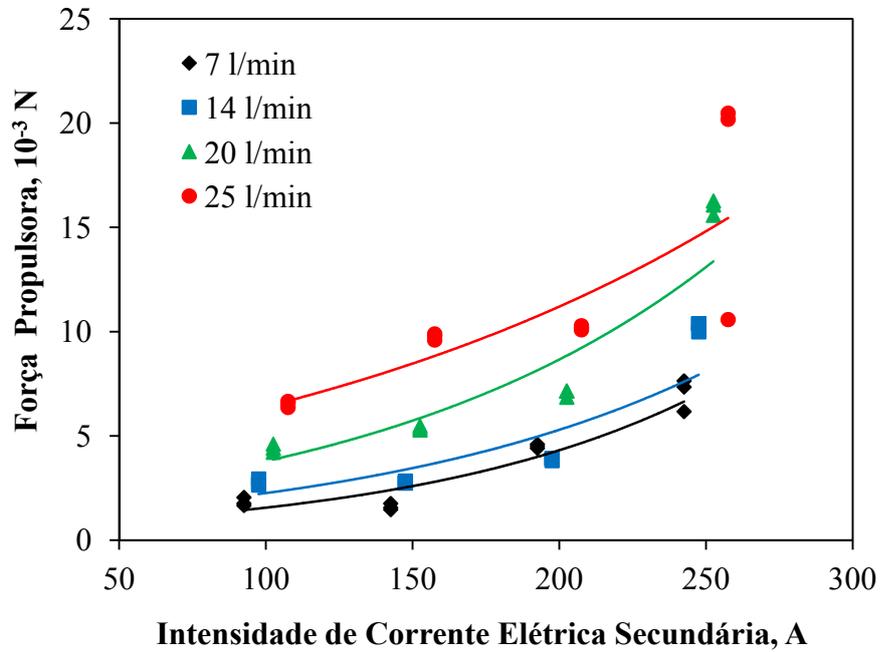
**Tabela 4.1.** Análise de variância (Fatorial ANOVA) para força propulsora.

Fontes	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P – valor
$I_P$	128,64	3	42,88	77,53	0,000000
$I_S$	2686,05	3	895,35	1618,70	0,000000
$V_g$	1675,13	3	558,38	1009,49	0,000000
Erro	70,80	128	0,55	----	----
Total	4828,32	191	----	----	----

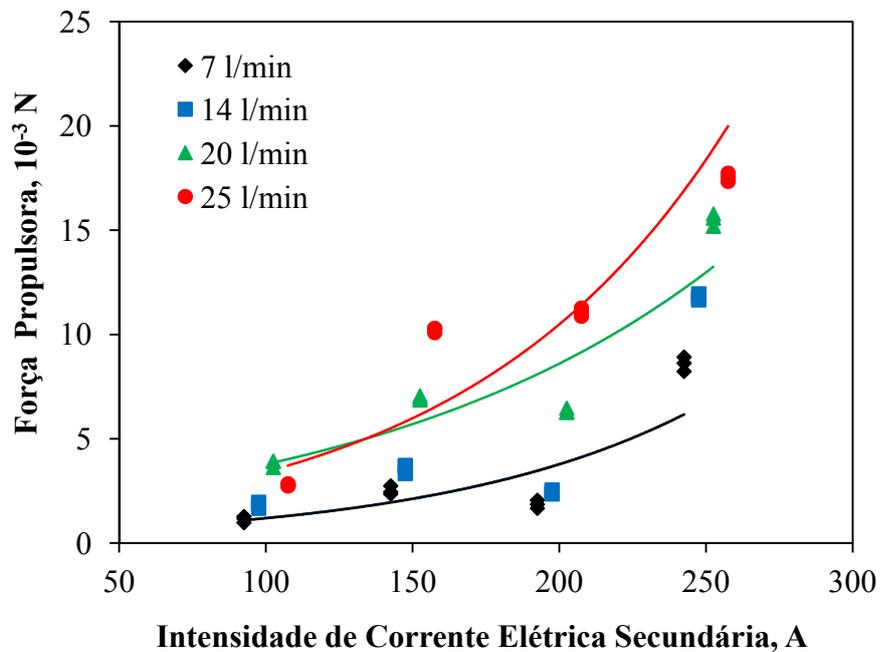
Gráficos foram plotados com o intuito de melhor observar os efeitos das variáveis (parâmetros) sobre a força propulsora, nos quais linhas de tendência (“best fit”) exponenciais foram adicionadas com o objetivo de comparar os resultados com o modelo matemático (**Equação 2.11**) descrito por [Burton, Clark e Jahn \(1983\)](#), o qual apresenta um aumento exponencial da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica e da vazão do gás.

A **Figura 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7** apresentam os gráficos da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás. As intensidades de corrente elétrica entre os eletrodos primários foram, respectivamente, de 30 A, 40 A, 50 A e 60 A. Estes gráficos mostram que, em média, a força propulsora resultante teve um aumento significativo com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e da vazão do gás. A **Figura 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11** apresentam os gráficos da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás. As intensidades de corrente elétrica entre os eletrodos secundários foram, respectivamente, de 100 A, 150 A, 200 A e 250 A. Estes gráficos mostram que, em média, a força propulsora resultante teve um pequeno aumento em função do aumento da intensidade de corrente elétrica primária e da vazão do gás, com exceção dos experimentos realizados com vazão do gás de 7 l/min e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A que apresentaram um comportamento decrescente da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária. Este

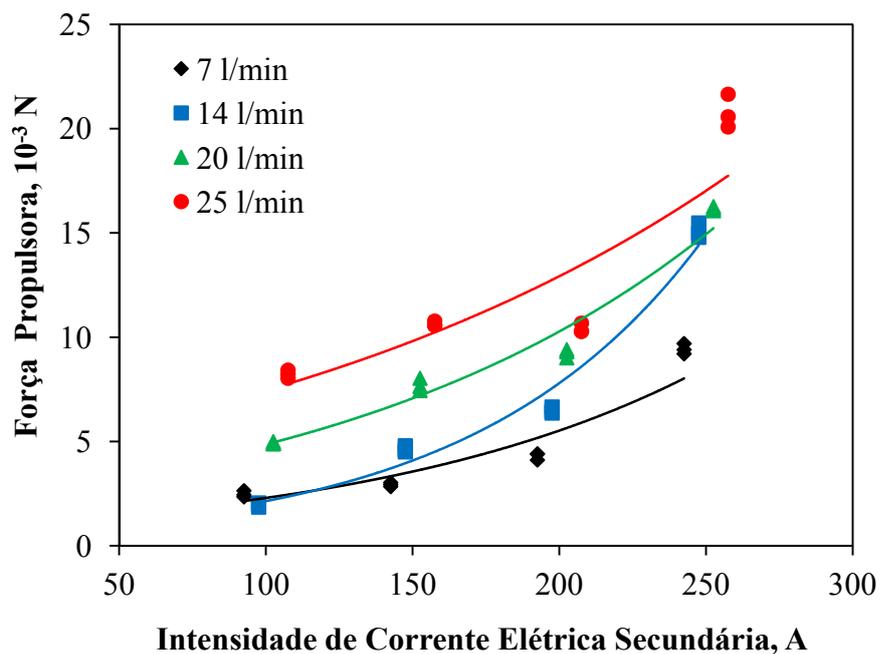
comportamento, possivelmente, está relacionado com alguma instabilidade do arco elétrico primário no momento da obtenção dos dados.



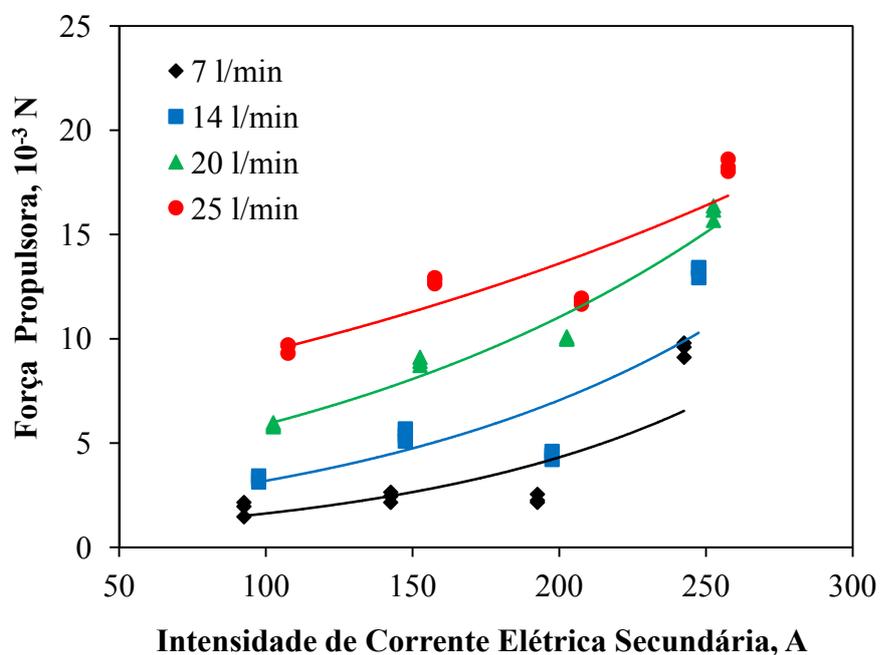
**Figura 4.4.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A.



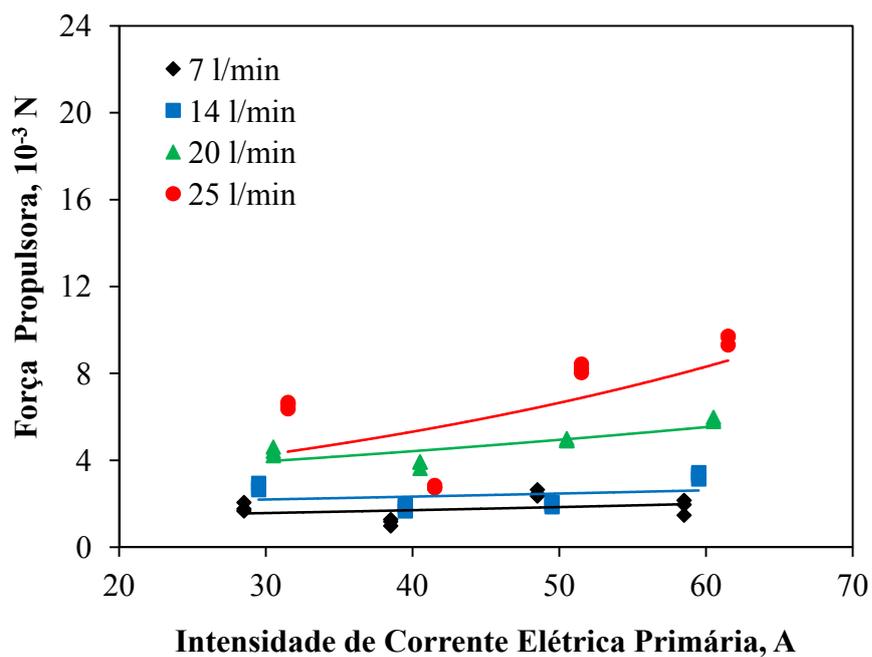
**Figura 4.5.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A.



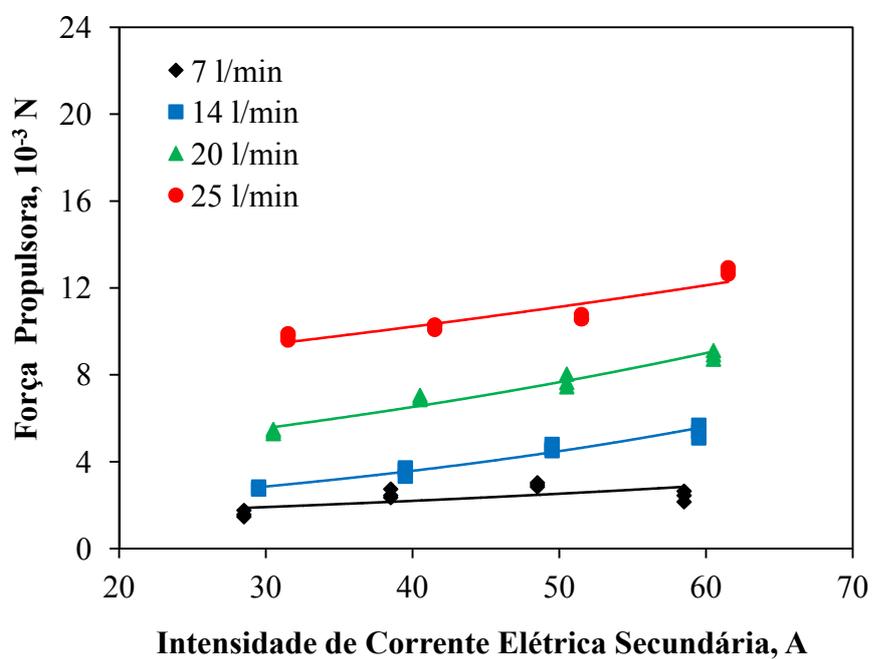
**Figura 4.6.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A.



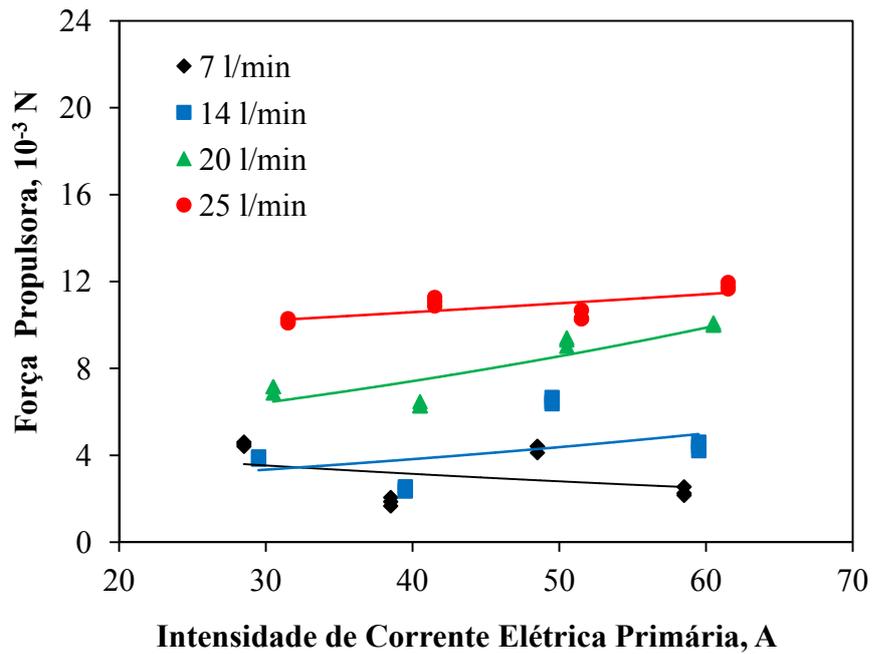
**Figura 4.7.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A.



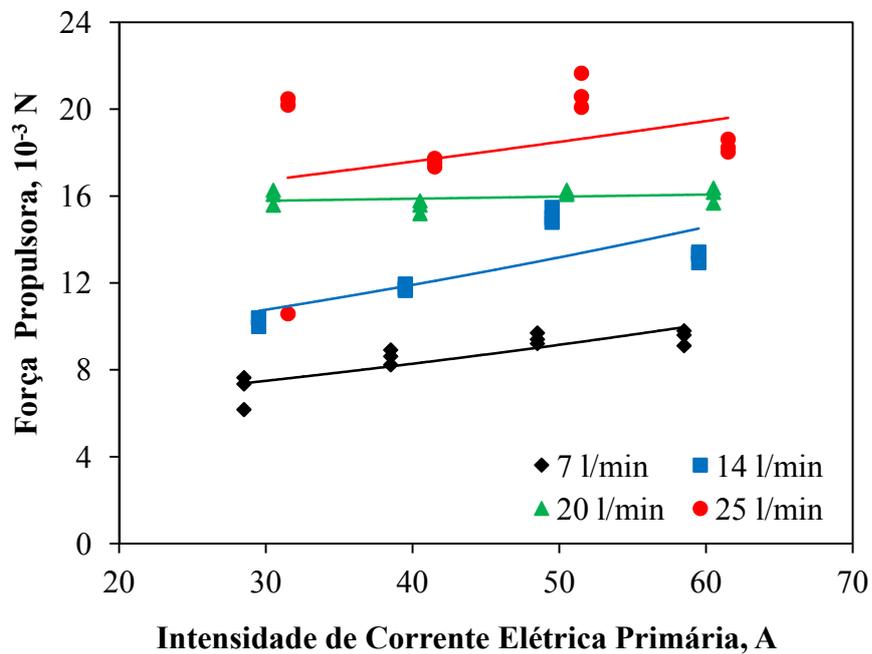
**Figura 4.8.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.



**Figura 4.9.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A.



**Figura 4.10.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.



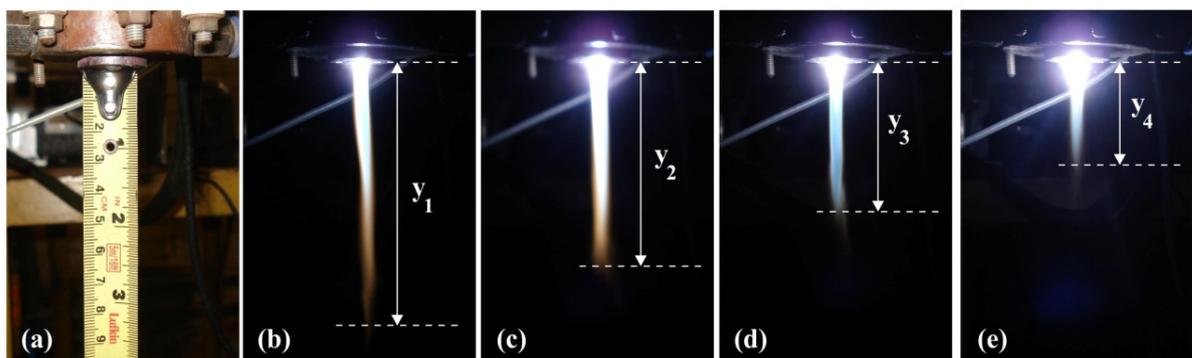
**Figura 4.11.** Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.

Analisando os gráficos pode-se observar que os valores encontrados para as forças propulsoras são levemente maiores que os valores obtidos com a **Equação 2.11** (Burton,

Clark e Jahn, 1983), pois, na tocha de plasma híbrida, o gás foi duplamente acelerado, isto é, o gás foi acelerado primeiro pelo arco elétrico formado entre os eletrodos primários e, sequencialmente, pelo arco elétrico formado entre os eletrodos secundários. Também, o aumento da força propulsora em função das variáveis físicas (vazão do gás e intensidade de corrente elétrica) pode ser determinado através do modelo matemático descrito por Tikhonov *apud* Sankaran (2005), no qual a força propulsora resultante de MPDTs aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica e da vazão do gás devido ao aumento do fenômeno de dissociação e ionização das moléculas que, conseqüentemente, aumenta a aceleração das partículas ionizadas.

#### 4.2.2 Comprimento do Jato de Plasma

A **Figura 4.12(b-e)** mostra uma seqüência de fotos, nas quais os comprimentos  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  e  $y_4$  dos jatos de plasma são representados. Também, o padrão de distância para determinar o comprimento do jato de plasma expulso para fora da câmara é apresentado através da **Figura 4.12(a)**. Estes jatos de plasma foram adquiridos com os seguintes parâmetros: intensidade de corrente elétrica primária de 30 A; intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A; e vazão do gás de 7 l/min (**Figura 4.12(b)**), 14 l/min (**Figura 4.12(c)**), 20 l/min (**Figura 4.12(d)**) e 25 l/min (**Figura 4.12(e)**). Através das imagens, observa-se que o comprimento do jato de plasma diminui com o aumento da vazão do gás. Isto foi observado em todos os experimentos.



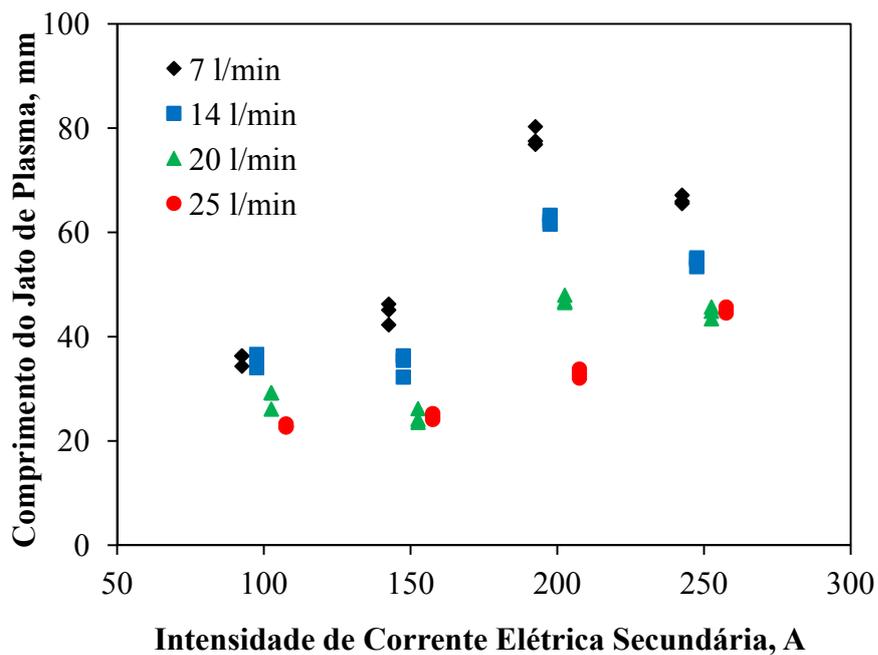
**Figura 4.12.** (a) Padrão de distância para determinar o comprimento do jato de plasma. Jatos de plasma expulso para fora da câmara, com indicação dos respectivos comprimentos, para intensidades de corrente elétrica, primária de 30 A e secundária de 200 A, e vazões do gás de (b) 7 l/min, (c) 14 l/min, (d) 20 l/min e (e) 25 l/min.

A **Tabela 4.2** apresenta os resultados da análise de variância, com nível de confiabilidade de 95%, para comprimento do jato de plasma expulso para fora da câmara. Através desta análise, observa-se que os valores de probabilidade P-valor são menores que 0,05 e, conseqüentemente, com 95% de confiabilidade pode-se dizer que todas as variáveis tiveram influência significativa sobre comprimento do jato de plasma. Também, as variáveis que tiveram maior influência sobre o comprimento do jato de plasma podem ser determinadas pelos valores de F, isto é, quanto maior o valor de F maior será a influência. Então, as variáveis mais influentes sobre o comprimento do jato de plasma foram: a intensidade de corrente elétrica secundária e a vazão de gás.

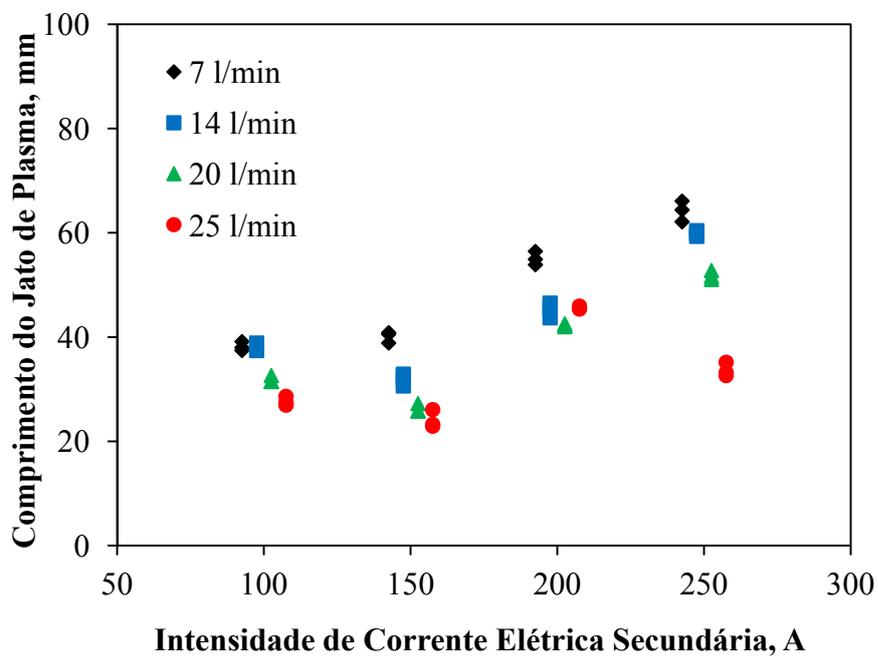
**Tabela 4.2.** Análise de variância (Fatorial ANOVA) para o comprimento do jato de plasma.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P – Valor
$I_P$	639,9	3	213,3	147,6	0,0000
$I_S$	18449,3	3	6149,8	4256,2	0,0000
$V_g$	16315,2	3	5438,4	3763,9	0,0000
Erro	184,9	128	1,4	----	----
Total	44543,7	191	----	----	----

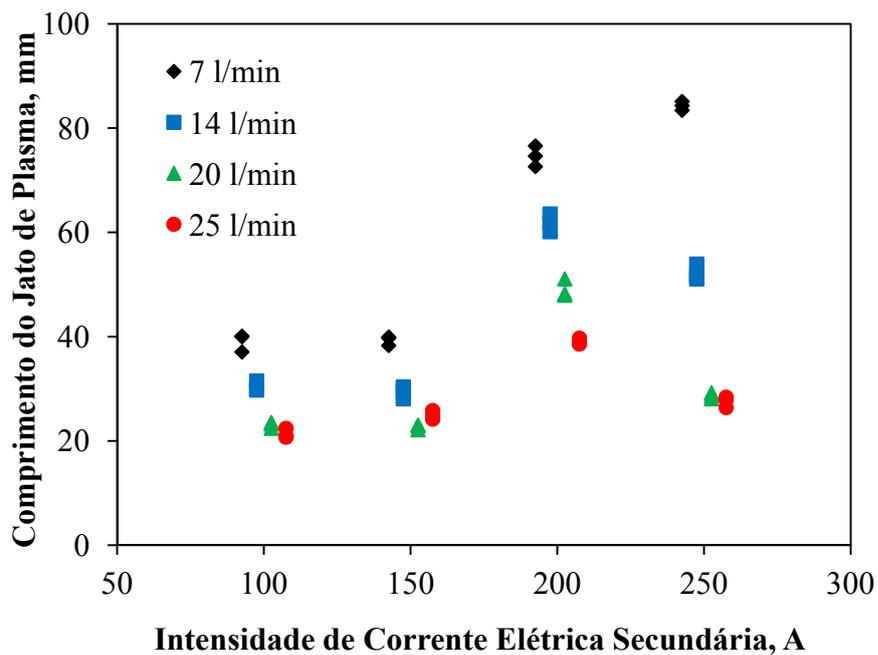
A **Figura 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16** apresentam os gráficos do comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás. As intensidades de corrente elétrica entre os eletrodos primários foram, respectivamente, de 30 A, 40 A, 50 A e 60 A. Estes gráficos mostram que, em média, o comprimento do jato de plasma aumentou com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e diminuiu com o aumento da vazão do gás. A **Figura 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20** apresentam os gráficos do comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás. As intensidades de corrente elétrica entre os eletrodos secundários foram, respectivamente, de 100 A, 150 A, 200 A e 250 A. Estes gráficos mostram que o comprimento do jato de plasma sofreu pequenas variações em função da intensidade de corrente elétrica primária e diminuiu com o aumento da vazão do gás.



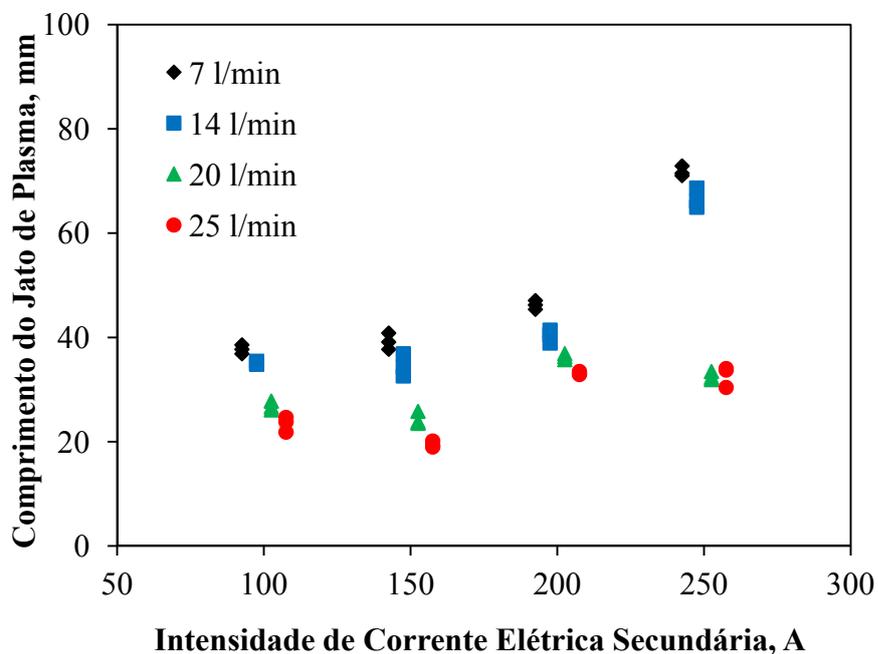
**Figura 4.13.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A.



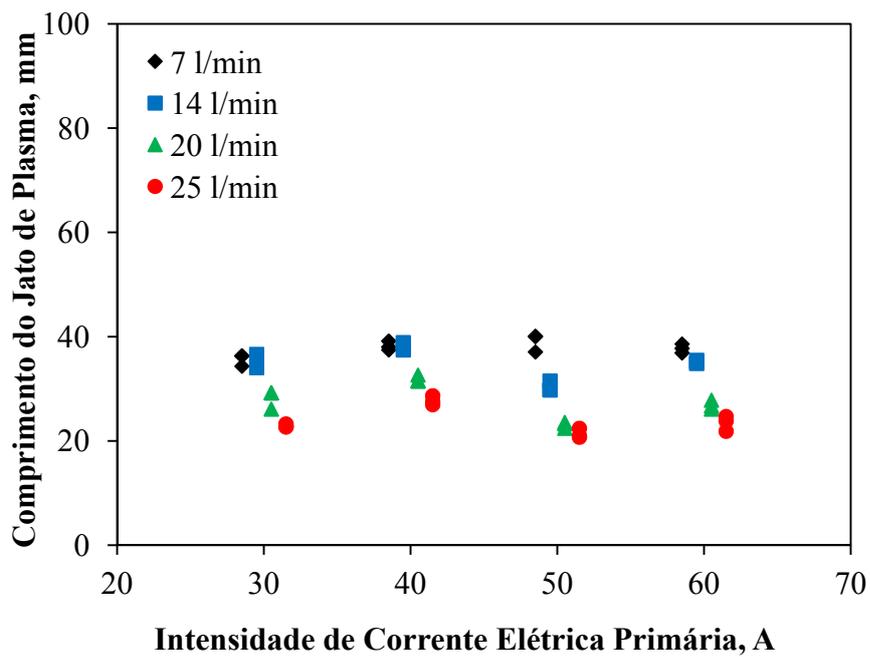
**Figura 4.14.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A.



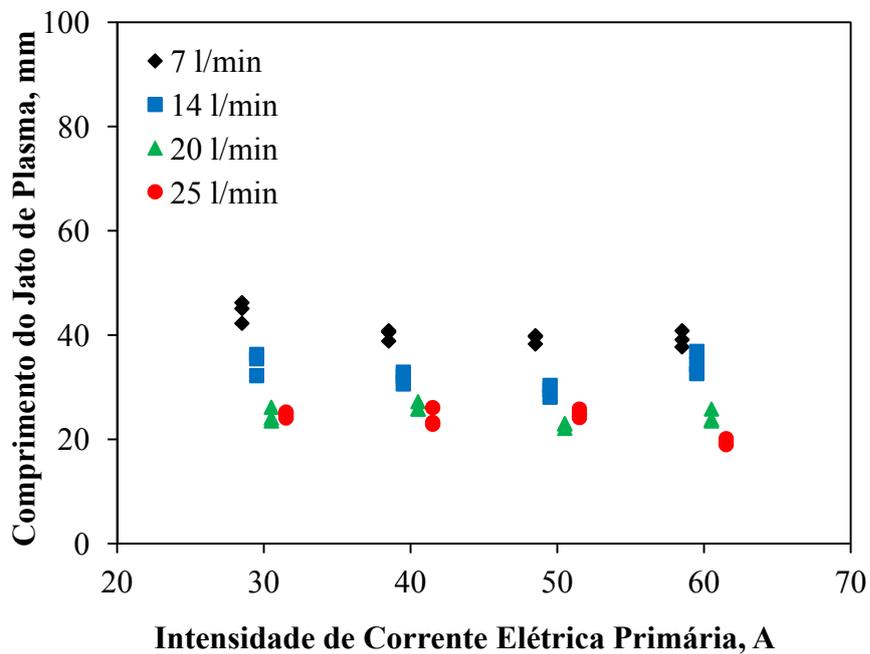
**Figura 4.15.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A.



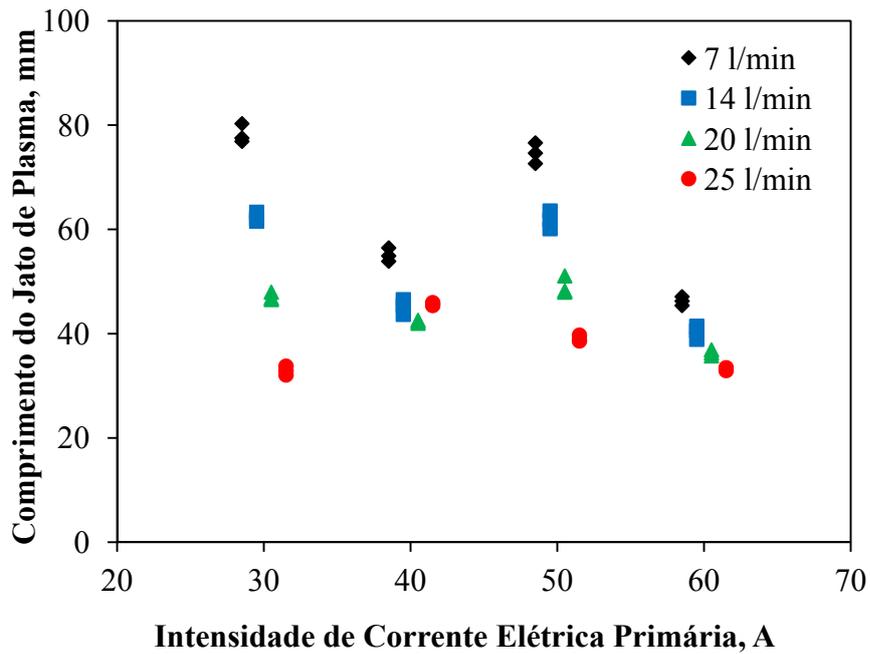
**Figura 4.16.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A.



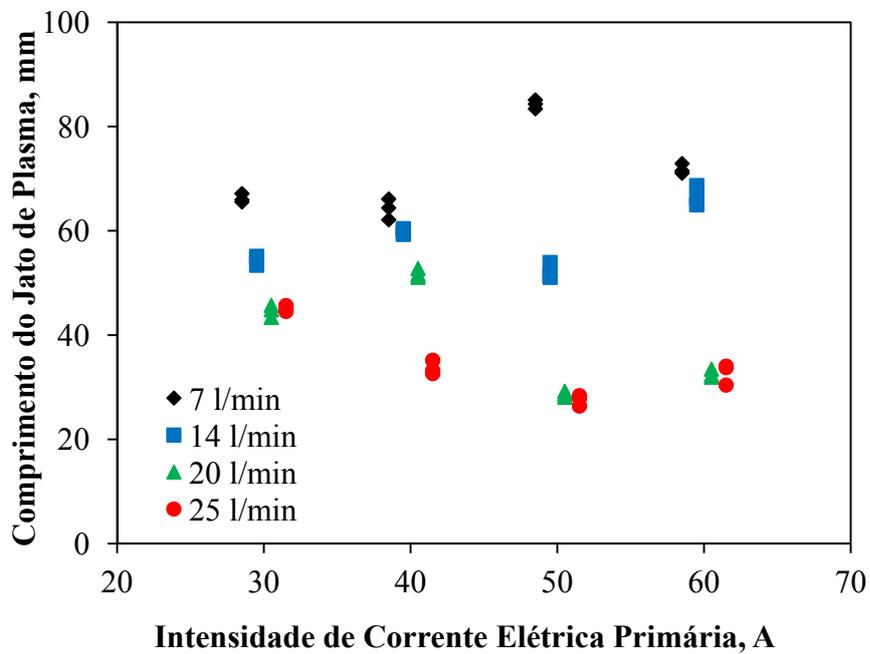
**Figura 4.17.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.



**Figura 4.18.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A.



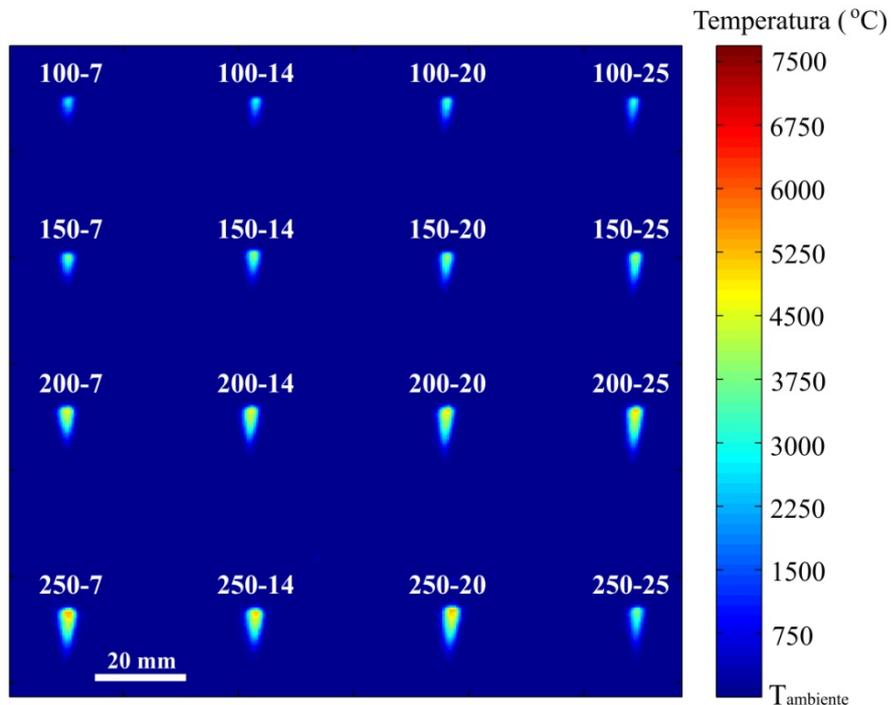
**Figura 4.19.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.



**Figura 4.20.** Comprimento do jato de plasma em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões de gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.

#### 4.2.3 Distribuição de Temperatura no Jato de plasma

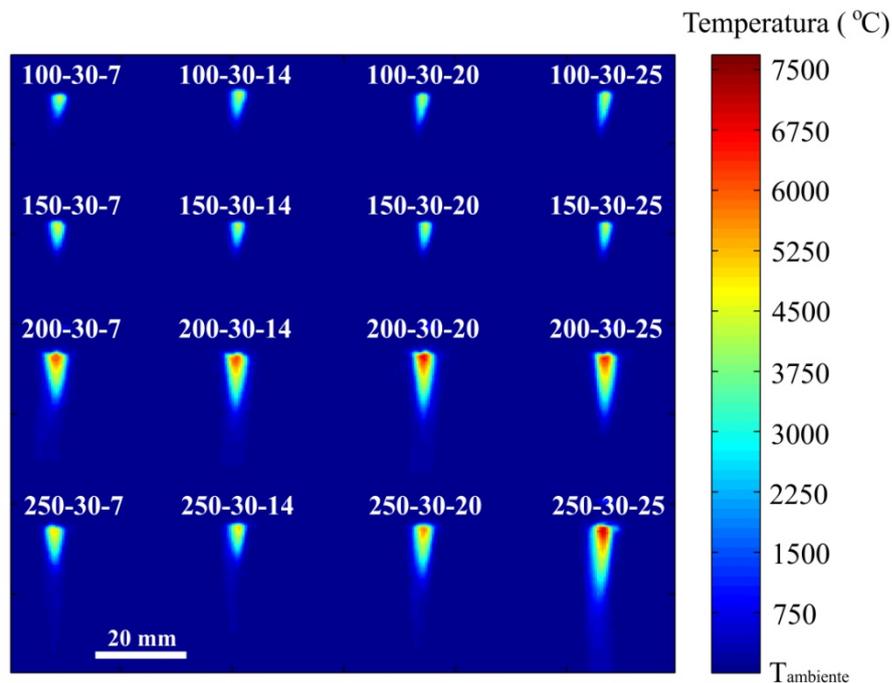
A **Figura 4.21** mostra as distribuições de temperatura nos jatos de plasma, em forma de cone, gerados pela tocha de plasma híbrida operando somente com a fonte de potência secundária. Nos experimentos realizados com vazão do gás de 7 l/min, 14 l/min e 20 l/min, observou-se que a temperatura aumentou com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária. Para os experimentos realizados com vazão do gás de 25 l/min, a temperatura aumentou e diminuiu, respectivamente, nos intervalos de intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A à 200 A e 200 A à 250 A. Esta diminuição de temperatura foi possivelmente causada por uma instabilidade do jato de plasma. A máxima temperatura nestes experimentos foi de, aproximadamente, 5000 °C. A variação da vazão do gás teve pouca influência sobre a distribuição de temperatura nestes experimentos, com exceção dos experimentos realizados com intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A, nos quais o gradiente de temperatura na direção axial aumentou com o aumento da vazão do gás.



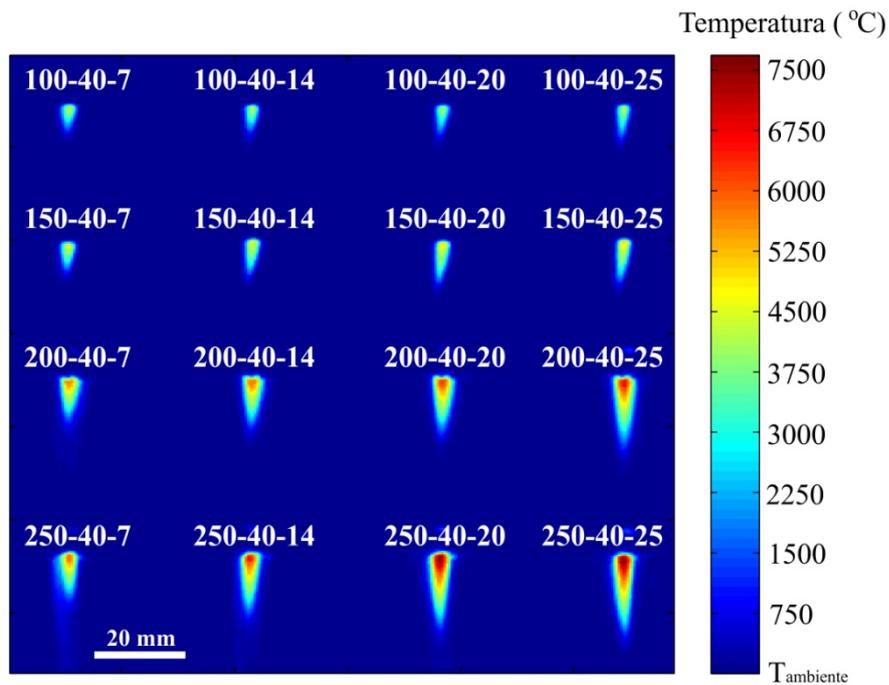
**Figura 4.21.** Distribuição de temperatura nos jatos de plasma gerados somente pela fonte de potência secundária. Experimentos realizados com diferentes intensidades de corrente elétrica secundária e vazões do gás (valores indicados acima dos perfis).

As **Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25** mostram as distribuições de temperatura nos jatos de plasma, em forma de cone, gerados pela tocha de plasma híbrida operando com intensidade de corrente elétrica primária de, respectivamente, 30 A, 40 A, 50 A e 60 A, intensidade de corrente elétrica secundária de, 100 A, 150 A, 200 A e 250 A, e vazão do gás de 7 l/min, 14 l/min, 20 l/min e 25 l/min.

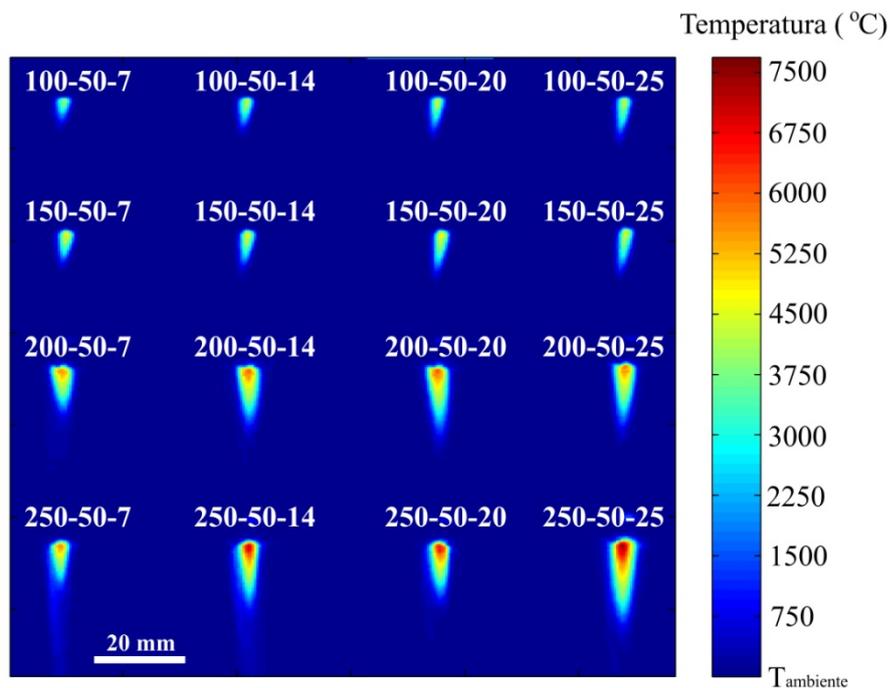
Os resultados mostram que a intensidade de corrente elétrica primária tem influência significativa sobre a distribuição de temperatura, pois as distribuições de temperatura, para todos os experimentos realizados com a tocha de plasma operando com os dois arcos elétricos (primário e secundário) simultaneamente, apresentaram gradientes de temperatura na direção axial maiores quando comparados com os experimentos realizados com apenas um arco elétrico (secundário). Isto acontece porque o gás é, inicialmente, aquecido e ionizado pelo arco elétrico primário e, sequencialmente, é aquecido e acelerado novamente pelo arco elétrico secundário, aumentando assim o gradiente de temperatura na direção axial do jato de plasma expulso para fora da câmara.



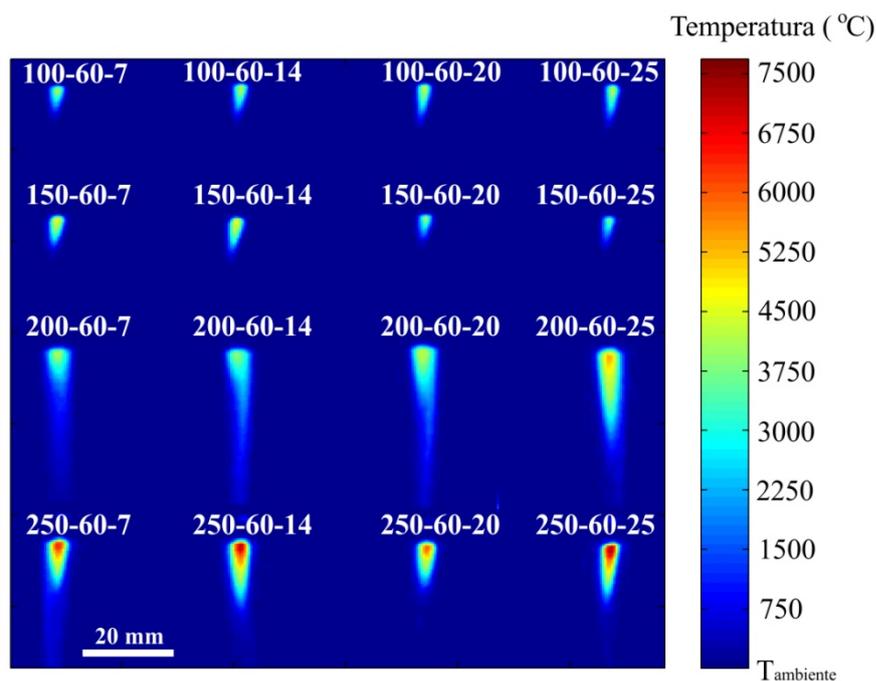
**Figura 4.22.** Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 30 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis).



**Figura 4.23.** Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 40 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis)



**Figura 4.24.** Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 50 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis)



**Figura 4.25.** Distribuição de temperatura dos jatos de plasma para diferentes intensidades de corrente elétrica, primária de 60 A e secundária de 100 A à 250 A, e vazões do gás de 7 l/min à 25 l/min (valores indicados acima dos perfis).

Os experimentos realizados com intensidades de corrente elétrica primária de 40 A e 50 A, intensidades de corrente elétrica secundária de 100 A, 150 A, 200 A e 250 A, e vazões do gás de 7 l/min, 14 l/min, 20 l/min e 25 l/min, foram aqueles que apresentaram jatos de plasma com variações das distribuições de temperatura mais uniformes, isto é, o gradiente de temperatura na direção axial aumentou com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e da vazão do gás. Os outros experimentos apresentaram algumas irregularidades na formação da distribuição de temperatura, isto é, a variação dos gradientes de temperaturas na direção axial não foi uniforme. Possivelmente, estas irregularidades ocorreram devido ao funcionamento da tocha de plasma híbrida ser nos limites inferiores e superiores de intensidades de corrente elétrica primária, onde o arco elétrico primário tinha um comportamento irregular.

#### 4.2.4 Curvas Características – $U \times I$

As **Tabelas 4.3** e **4.4** apresentam os resultados da análise de variância, com nível de confiabilidade de 95%, para as tensões elétricas RMS geradas entre os eletrodos primário ( $U_p$ ) e secundário ( $U_s$ ), respectivamente. Nesta análise de variância, os valores de

probabilidade P-valor são menores que 0,05 e, conseqüentemente, com 95% de confiabilidade, pode-se afirmar que todas as variáveis tiveram influência significativa sobre as tensões elétricas RMS gerada entre os eletrodos primário e secundário. Também, as variáveis que tiveram maior influência sobre as tensões elétrica RMS podem ser determinados pelos valores de F, isto é, quanto maior o valor de F maior será a influência.

**Tabela 4.3.** Análise de variância (Fatorial – ANOVA) para a tensão elétrica – RMS entre os eletrodos primários.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P – Valor
$I_P$	65,99	3	22,00	34,6	0,000000
$I_S$	20,66	3	6,89	10,8	0,000002
$V_g$	12,78	3	4,26	6,7	0,000311
Erro	81,45	128	0,64	----	----
Total	556,26	191	----	----	----

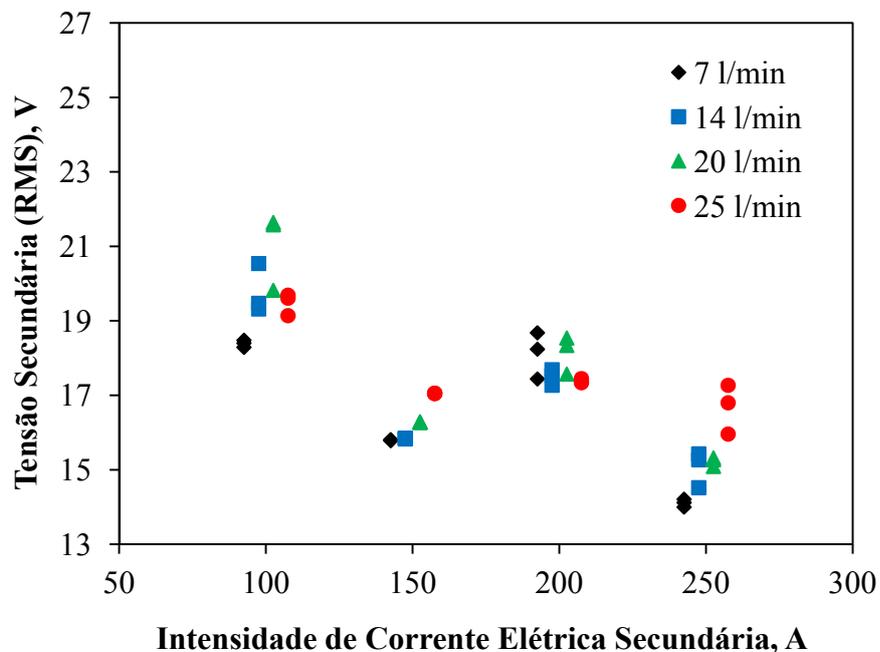
**Tabela 4.4.** Análise de variância (Fatorial – ANOVA) para a tensão elétrica – RMS entre os eletrodos secundários.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P - Valor
$I_P$	6,72	3	2,24	6,9	0,000237
$I_S$	199,93	3	66,64	205,6	0,000000
$V_g$	31,76	3	10,59	32,7	0,000000
Erro	41,48	128	0,32	----	----
Total	583,65	191	----	----	----

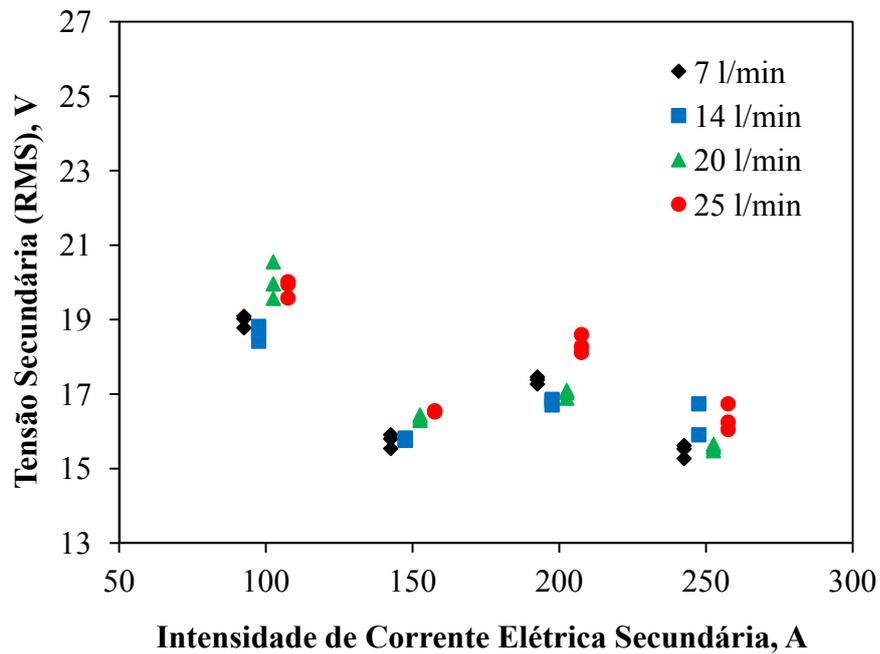
Analisando as **Tabelas 4.3** e **4.4**, observa-se que a intensidade de corrente elétrica primária teve maior influência sobre a variação de tensão elétrica entre os eletrodos primários (tensão primária –  $U_p$ ) e que a intensidade de corrente elétrica secundária foi a mais influente sobre a tensão entre os eletrodos secundários (tensão secundária –  $U_s$ ).

As **Figuras 4.26** até **4.41** apresentam as tensões RMS (primária e secundária) em função da intensidade de corrente elétrica primária e da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões de gás. Através destes gráficos, observa-se que a tensão

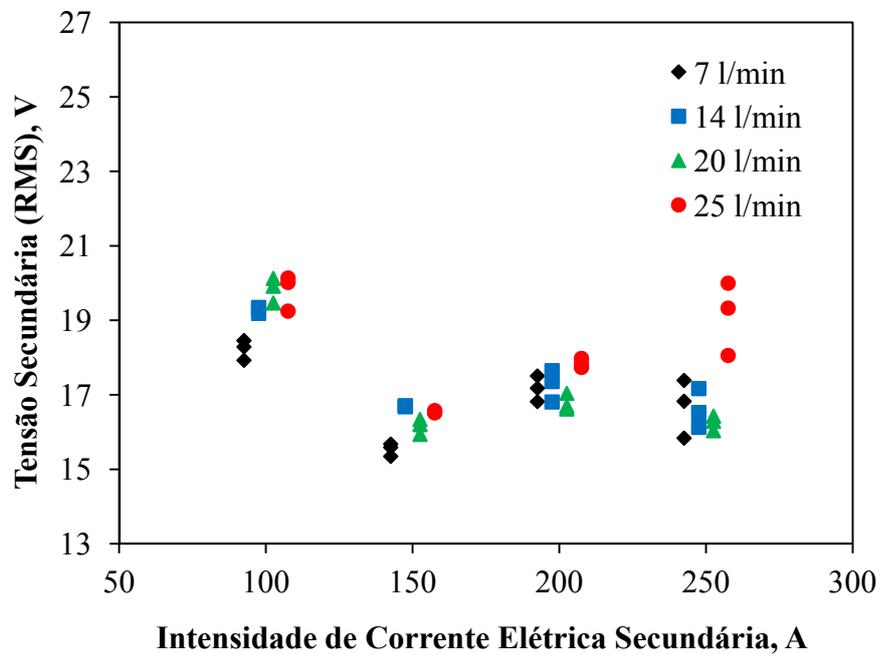
RMS primária possui os seguintes comportamentos: diminui (leve queda) com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária; aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A à 250 A; quase não varia para as vazões de gás de 7 l/min, 14 l/min e 20 l/min; e aumenta para uma vazão de gás de 25 l/min. Em relação à tensão secundária, observa-se que a mesma quase não varia com a com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária, diminui com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e aumenta com o aumento da vazão do gás. O aumento da tensão causado pelo aumento da vazão do gás ocorre devido ao aumento do campo elétrico entre os eletrodos, pois o fluxo de gás requer maior energia para aquecer e ionizar o gás. Em outras palavras, o aumento do fluxo de gás gera forças de arraste sobre o arco elétrico empurrando e afastando a raiz (ponto de conexão do arco elétrico entre os eletrodos – “spot”) do mesmo em relação aos eletrodos, aumentando assim a tensão. Também, algumas vezes, a coluna do arco pode sofrer maior constrição, tornando a camada de gás frio limite mais espessa e, com isso, levando a um maior comprimento do arco (TU, CHÉRON, *et al.*, 2008). A diminuição da tensão com o aumento da intensidade de corrente elétrica deve-se ao fato da temperatura do plasma aumentar, pois a condutividade elétrica aumenta como aumento da temperatura e, conseqüentemente, a tensão diminui (BARRETO, 1998).



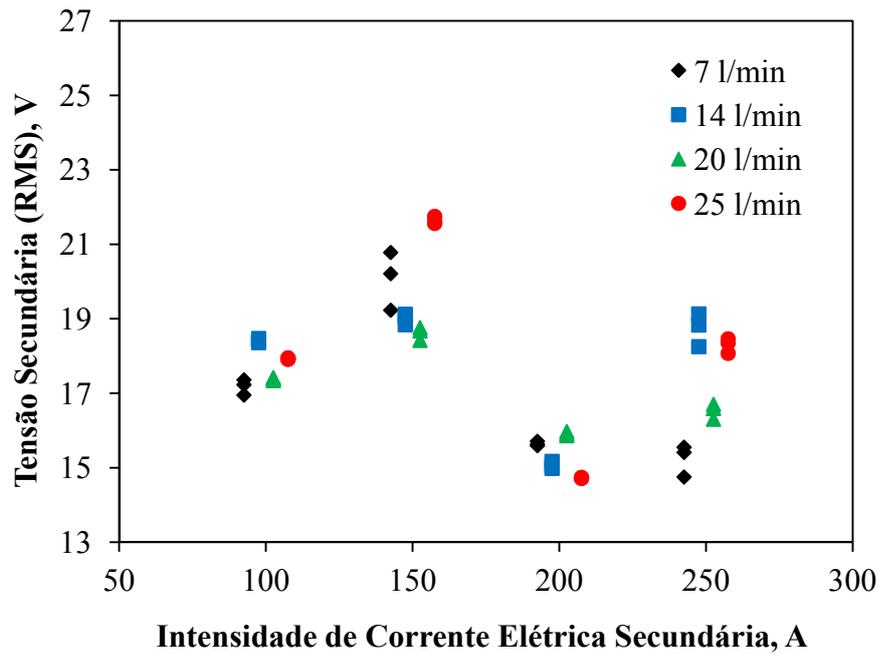
**Figura 4.26.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A.



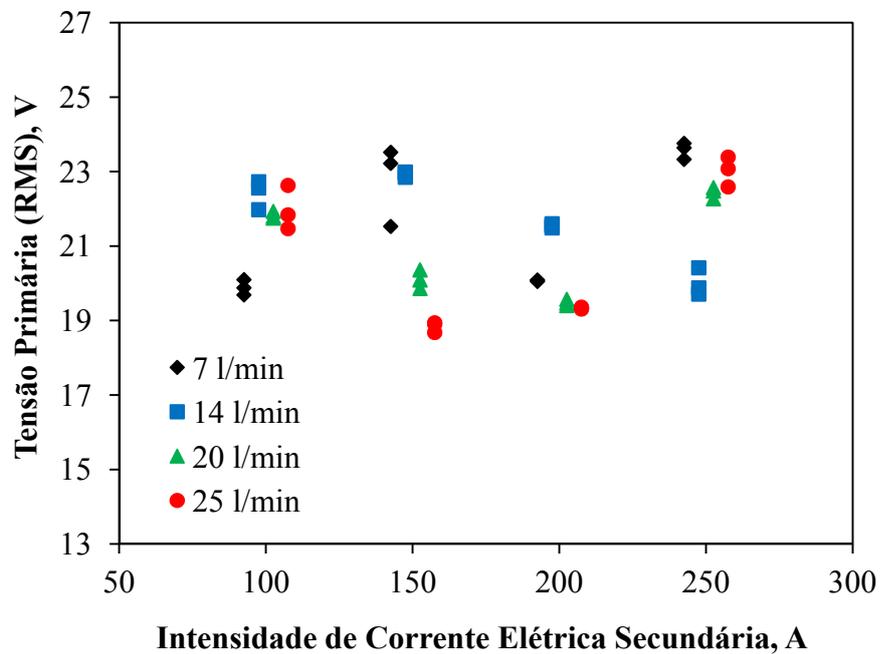
**Figura 4.27.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A.



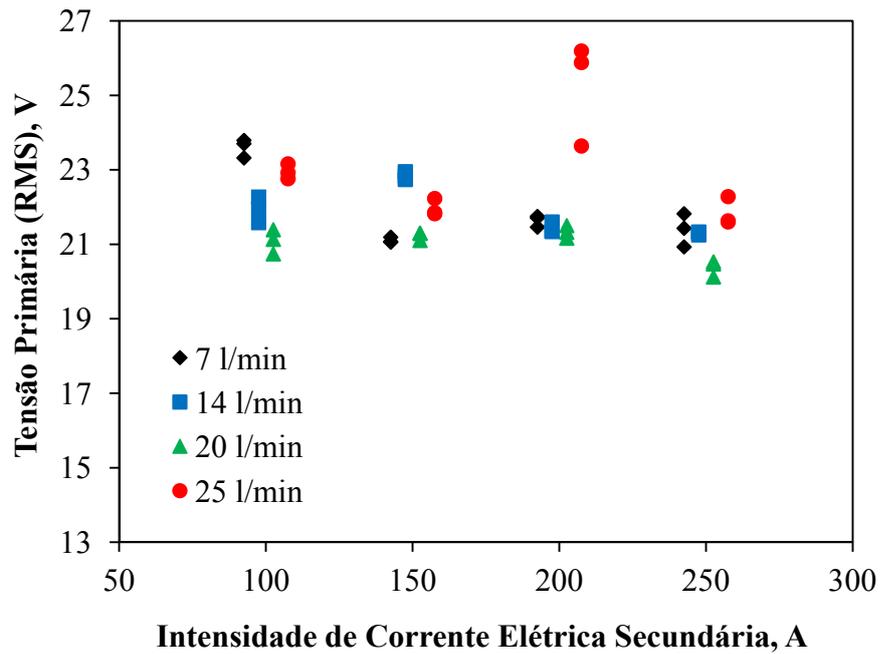
**Figura 4.28.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A.



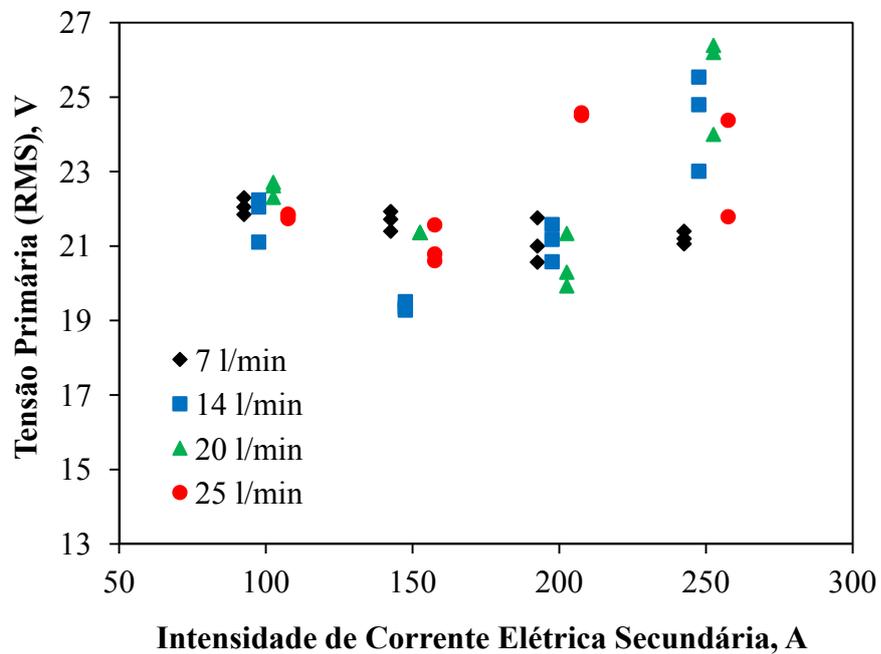
**Figura 4.29.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A.



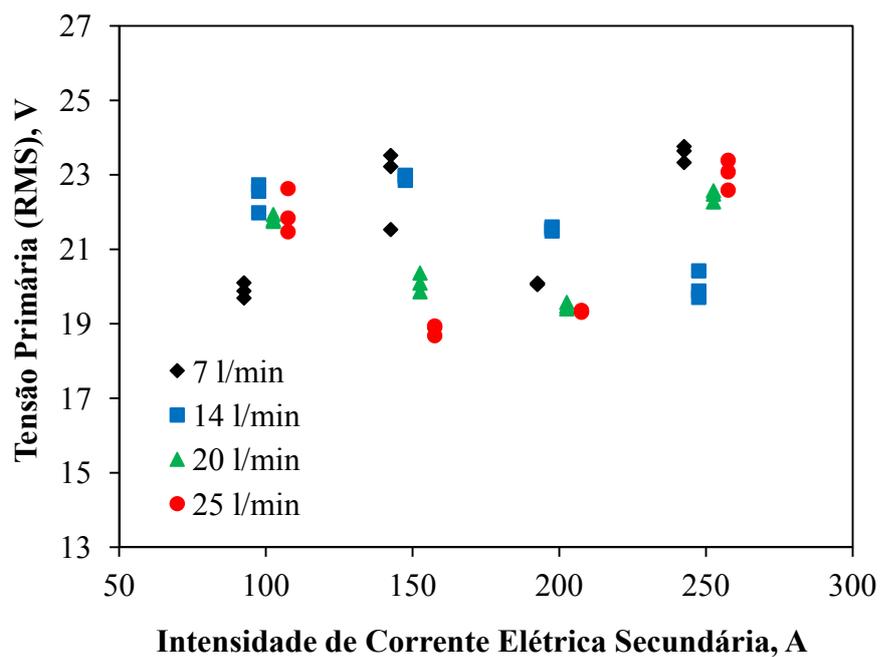
**Figura 4.30.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 30 A.



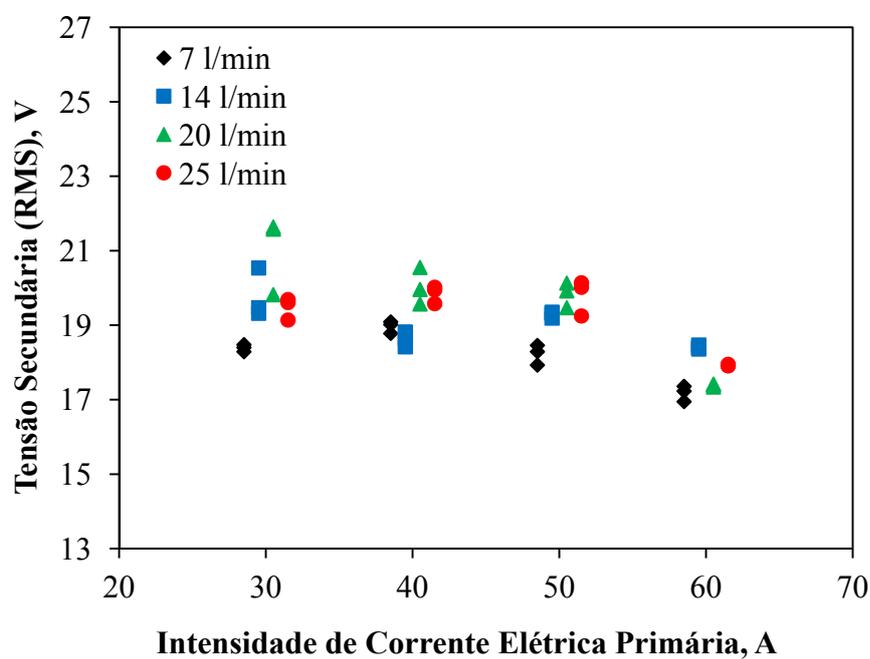
**Figura 4.31.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 40 A.



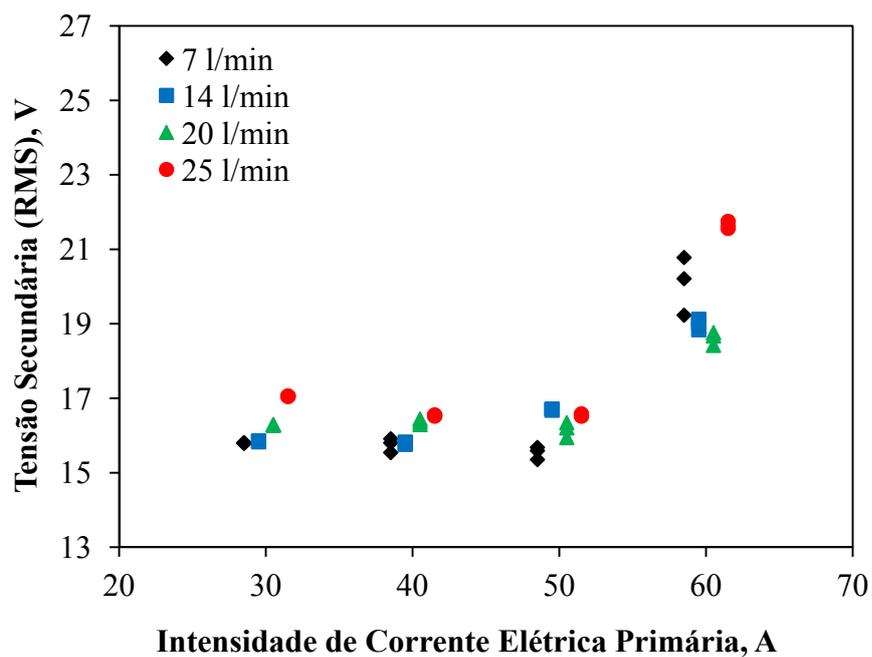
**Figura 4.32.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 50 A.



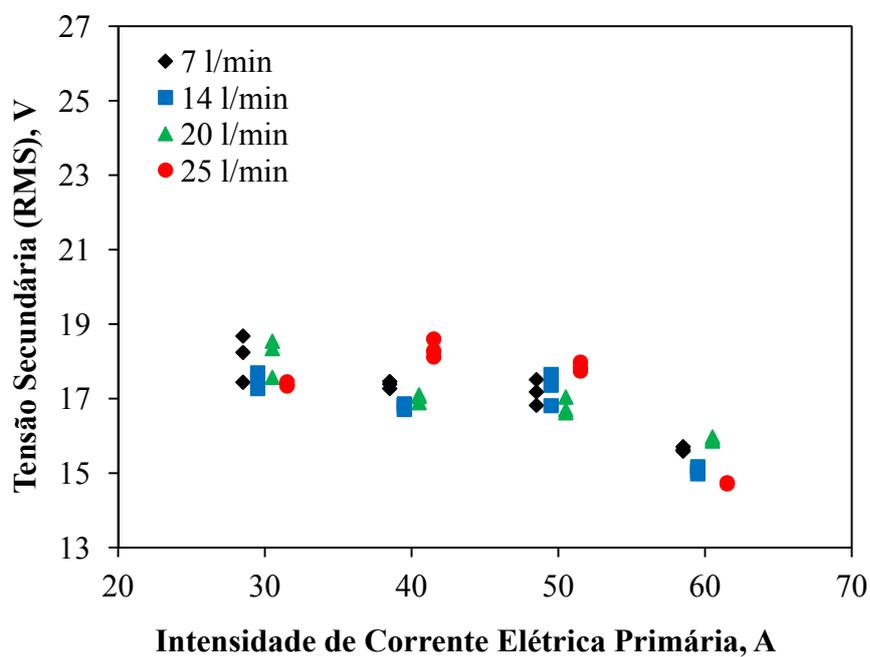
**Figura 4.33.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica secundária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica primária de 60 A.



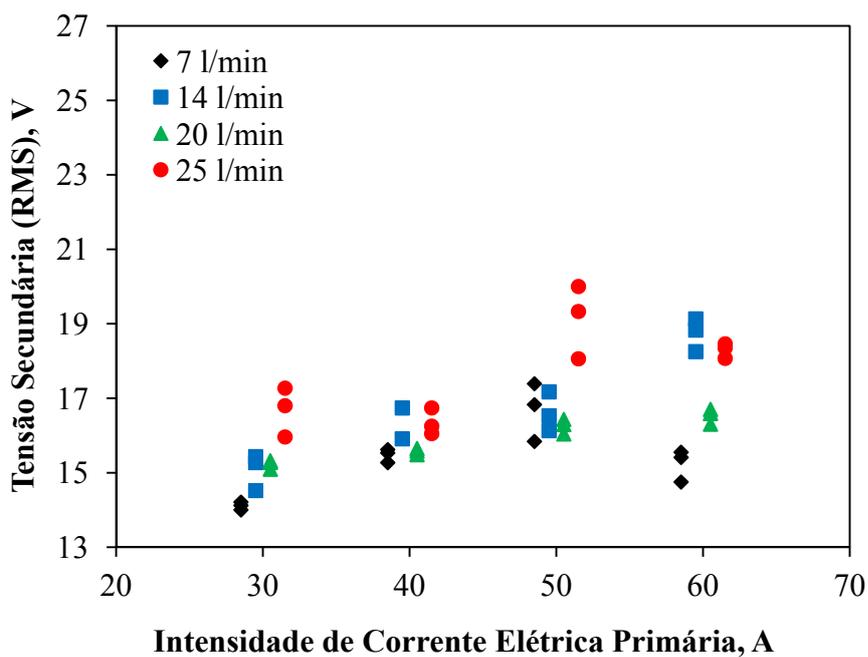
**Figura 4.34.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.



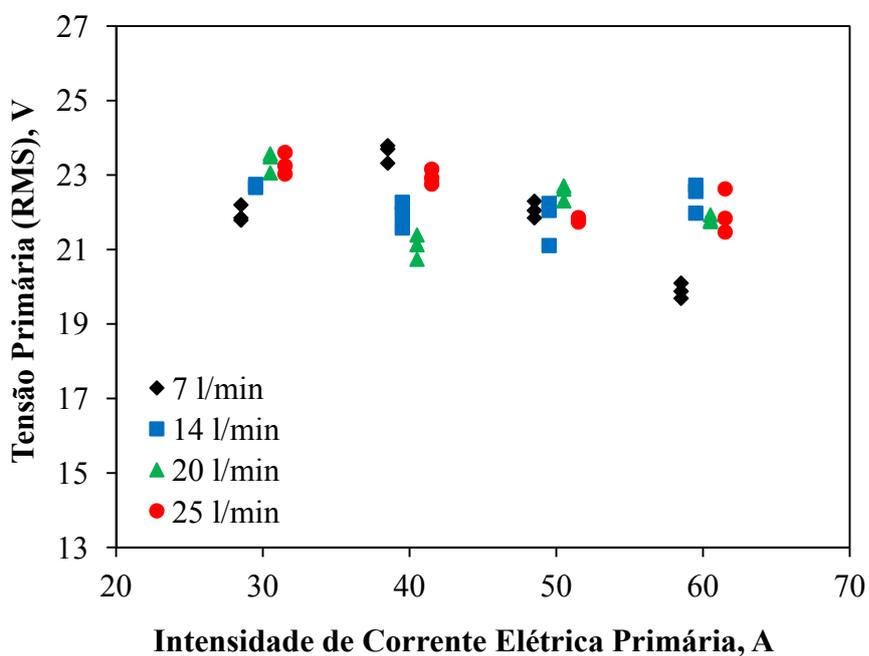
**Figura 4.35.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A



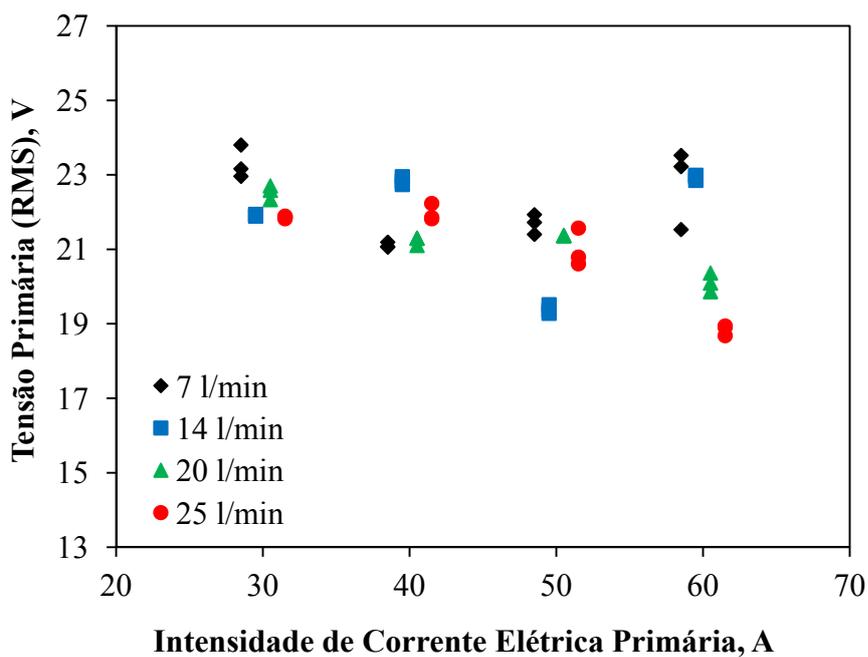
**Figura 4.36.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A



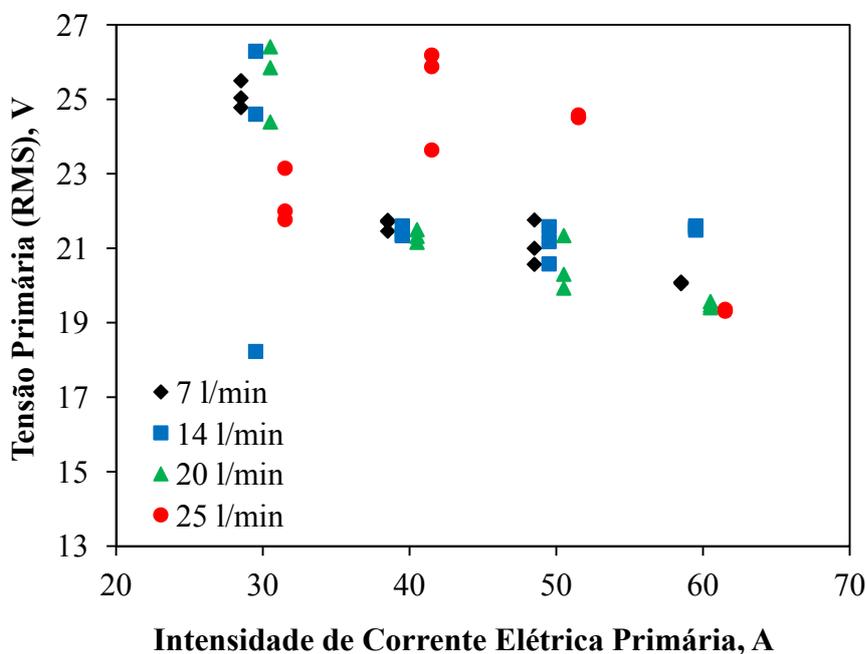
**Figura 4.37.** Tensão secundária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.



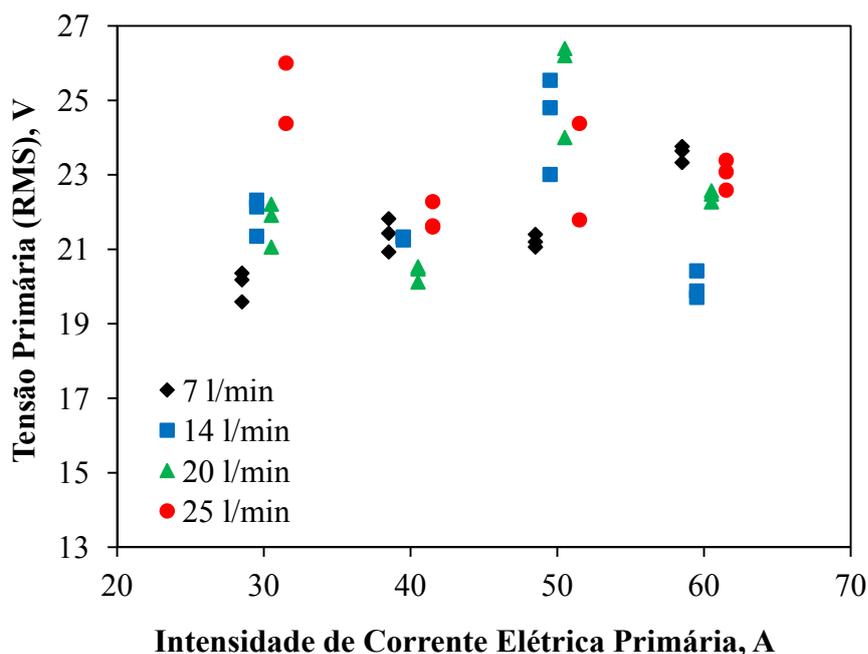
**Figura 4.38.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A.



**Figura 4.39.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A.

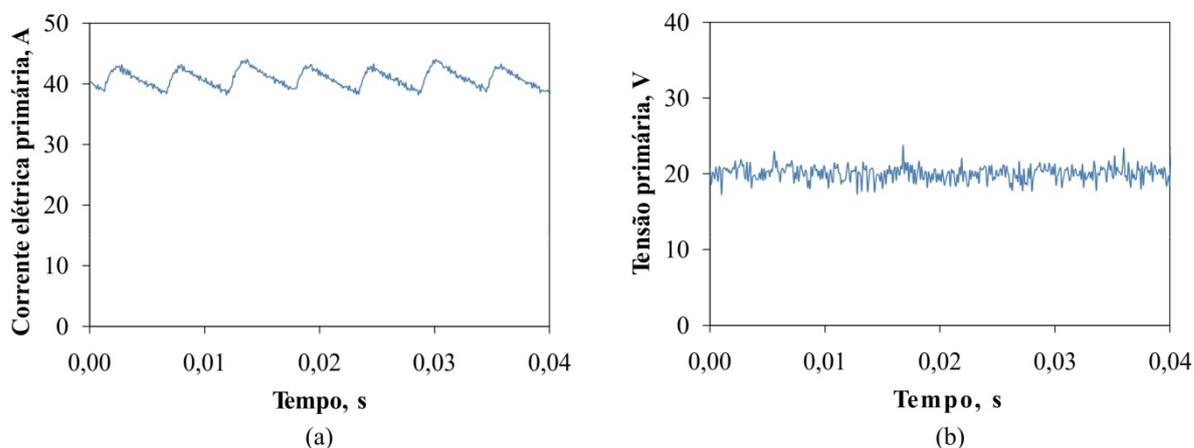


**Figura 4.40.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 200 A.



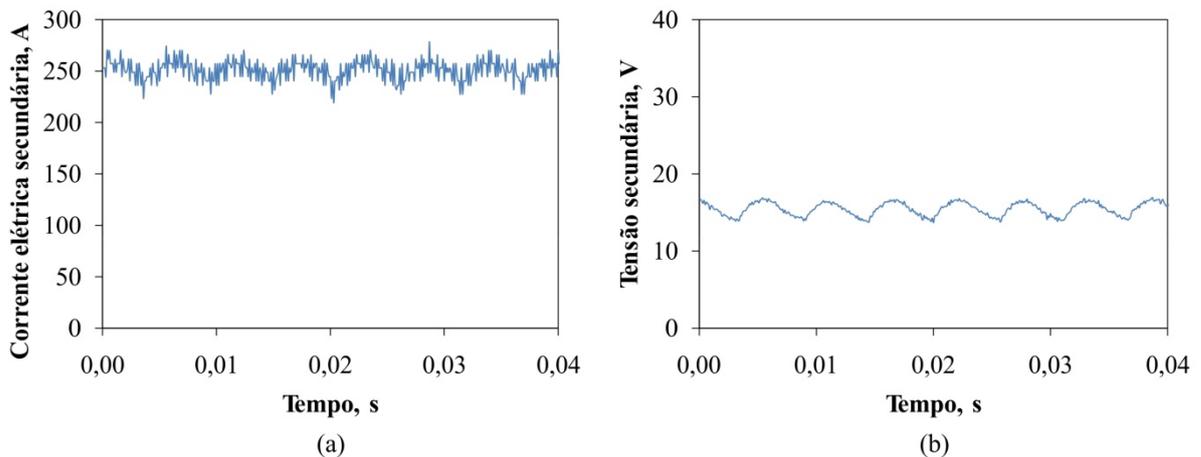
**Figura 4.41.** Tensão primária (RMS) em função da intensidade de corrente elétrica primária para diferentes vazões do gás e intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A.

A **Figura 4.42** apresenta os sinais de corrente elétrica e tensão (primária) em função do tempo para um experimento realizado com vazão de gás de 20 l/min. A corrente elétrica primária apresenta uma forma de onda dente de serra e a tensão apresenta uma forma de onda irregular. As oscilações de tensão primária foram irregulares devido ao movimento desgovernado do arco elétrico primário.



**Figura 4.42.** Sinais de (a) corrente primária –  $I_p$  e (b) tensão primária –  $U_p$  para uma vazão de argônio de 20 l/min.

A **Figura 4.43** apresenta os sinais de corrente elétrica e tensão (secundária) em função do tempo para um experimento realizado com vazão de gás de 20 l/min. A forma de onda encontrada para a corrente elétrica e tensão secundária são semelhantes, isto é, ambas apresentaram forma de meia onda senoidal devido ao método de retificação da fonte secundária (retificador com controle eletrônico de saída). O aumento e a diminuição da tensão secundária em função do tempo correspondem aos deslocamentos do arco elétrico secundário na direção do fluxo de plasma e na direção contrária ao fluxo de plasma, respectivamente. Nestes experimentos, segundo [Wua e Pan \(2011\)](#), pode-se dizer que o arco elétrico secundário opera no modo “takeover”, pois a tensão secundária apresentou características semelhantes a este modo de operação, tais como: oscilação semiperiódica da tensão, a qual correspondente a um movimento do arco elétrico também semiperiódico e bem definido; pequena amplitude do sinal de tensão e o espectro do sinal de tensão apresenta baixa frequência dominante.

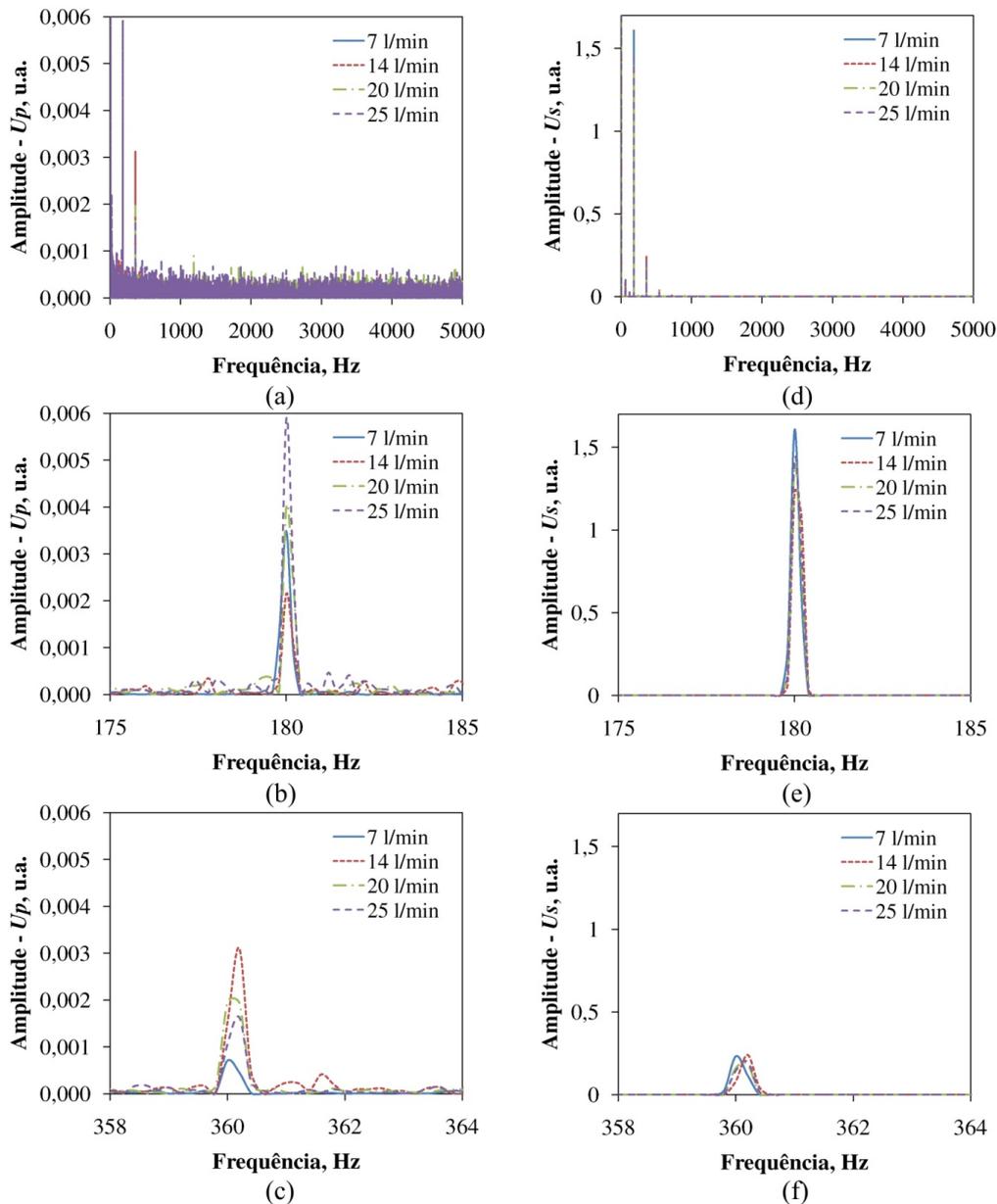


**Figura 4.43.** Sinais de (a) corrente secundária –  $I_S$  e (b) tensão secundária –  $U_S$  para uma vazão de argônio de 20 l/min.

As formas de onda encontradas em todos os experimentos foram semelhantes às descritas anteriormente.

As amplitudes espectrais para os sinais de tensão primária e secundária em função da frequência para diferentes vazões de gás são apresentadas pela **Figura 4.44**. Estas amplitudes foram obtidas pelo método da transformada rápida de Fourier (FFT – “Fast Fourier Transform”). Para qualquer que seja o sinal elétrico coletado nos experimentos, os resultados mostraram que o pico predominante de 180 Hz e harmônico de 360 Hz foram claramente visíveis em todos os espectros.

Estas frequências apresentaram-se praticamente independentes da vazão do gás para a tensão secundária, pois as mesmas originam-se das típicas frequências de ondulação da fonte de potência secundária. Para a tensão primária, os espectros apresentaram pequenas variações de amplitude espectral em relação à variação de vazão do gás. Além disso, pode-se notar que não houve componentes no espectro de alta frequência no intervalo de 1kHz à 5kHz, com isso, pode-se dizer que a frequência dominante foi originada da típica ondulação trifásica retificada pelas fontes de potência (TU, *et al.*, 2007).



**Figura 4.44.** Resultados da rápida transformada de Fourier para as tensões nos arcos elétricos, primário ( $U_p$ ) e secundário ( $U_s$ ), para diferentes vazões do gás.  $I_p = 40$  A e  $I_s = 250$  A. (a) (d) Intervalo de frequência de 0 à 5000 Hz, (b) (e) intervalo de frequência de 175 à 185 Hz e (c) (f) intervalo de frequência de 358 à 364.

#### 4.2.5 *Discussão sobre a Caracterização da Tocha de Plasma Híbrida*

A tocha de plasma híbrida foi caracterizada quanto à força propulsora resultante, ao comprimento do jato de plasma expulso para fora da câmara, à distribuição de temperatura no jato de plasma e a diferença de potencial entre os eletrodos (tensão primária e tensão secundária).

O intervalo de variação da intensidade da força propulsora foi de, aproximadamente,  $1 \times 10^{-3}$  N à  $2 \times 10^{-2}$  N, sendo que o menor valor foi adquirido com intensidade de corrente elétrica primária de 40 A, intensidade de corrente elétrica secundária de 100 A e vazão do gás de 7 l/min; e o maior valor foi obtido com intensidade de corrente elétrica primária de 50 A, intensidade de corrente elétrica secundária de 250 A e vazão do gás de 25 l/min. Também, observou-se que as curvas de intensidade da força propulsora em função das intensidades de corrente elétrica e vazão do gás foram semelhantes às curvas geradas através da **Equação 2.11**, a qual descreve o comportamento da força propulsora para dispositivos eletrotérmicos (“*arcjets*”) alimentados com argônio.

Os resultados obtidos na caracterização, em relação ao comprimento do jato de plasma, mostraram que as intensidades de corrente elétrica (primária e secundária) e a vazão do gás causam alterações significativas no comprimento do jato de plasma. As características observadas para os jatos de plasma gerados pela tocha de plasma híbrida são semelhantes aos resultados obtidos por Pan (2002), porém, uma exceção quanto aos resultados obtidos para a intensidade de corrente elétrica primária, onde o comprimento do jato de plasma tem uma pequena tendência decrescente com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária. De acordo com Pan (2002), pode-se afirmar que a diminuição do comprimento do jato de plasma com o aumento da vazão do gás deve-se ao fato de que o jato de plasma encontra-se em uma transição de fluxo laminar para um fluxo turbulento, isto é, as forças viscosas de cisalhamento, as quais dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do jato de plasma, não estão amortecendo as tendências de instabilidades e turbulência.

O maior valor de temperatura para os jatos de plasma expulsos para fora da câmara foi de, aproximadamente, 7800 °C. Esta temperatura pode ser observada numa região localizada perto da saída do anodo secundário. Esta temperatura foi atingida com a tocha de plasma híbrida operando com intensidades de corrente elétrica, primária de 40 A e secundária de 250 A, e vazão do gás de 25 l/min.

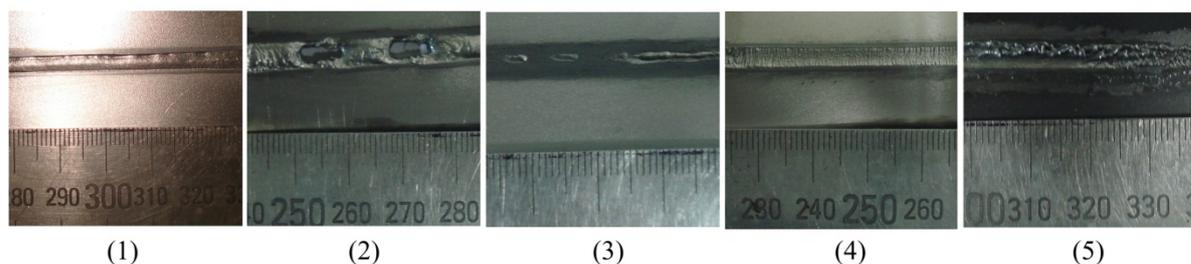
As distribuições de temperatura dos jatos de plasma para a tocha de plasma híbrida apresentaram características semelhantes aos experimentos e modelos matemáticos descritos na literatura, os quais descrevem os campos de temperatura e velocidade dos jatos de plasma gerados por tochas à arco não-transferido (SCOTT, KOVITYA e HADDAD, 1989; QUNBO, LU e FUNCHI, 2005; TRELLES, CHAZELAS, *et al.*, 2009). O aumento do gradiente de temperatura na direção axial, devido ao aumento da vazão do gás, pode ser explicado pela formação de forças de arraste sobre o arco elétrico que empurram o mesmo para fora da câmara. Já o aumento do gradiente de temperatura na direção axial devido ao aumento da intensidade de corrente elétrica deve-se ao aumento de energia entregue para o gás ionizado.

### 4.3 Aplicação em Processos de Fabricação

Os resultados obtidos para a aplicação do dispositivo em processos de fabricação foram satisfatórios, isto é, foi possível realizar soldagens, cortes e endurecimento superficial com a tocha de plasma híbrida, porém, estudos de otimização destes processos com a mesma devem ser realizados. Os cortes e soldagens realizados com a tocha de plasma híbrida apresentaram características semelhantes aos resultados da aplicação de um dispositivo MPDT em processo de fabricação (soldagem e corte térmico), os quais foram obtidos por Machado e Lermen (2008).

#### 4.3.1 Soldagem

A **Figura 4.45** mostra a vista superior das chapas submetidas à soldagem com a tocha de plasma híbrida, onde os números indicados nas fotografias correspondem aos números dos experimentos apresentados na **Tabela 4.5**, a qual também apresenta os parâmetros utilizados. O dispositivo mostrou-se capaz de realizar soldagem de chapas finas com vazões de gás iguais ou menores que 7 l/min, pois com vazões acima de 7 l/min o jato de plasma formou cordões de solda irregulares (experimentos 2 e 5). O experimento 3 apresenta algumas falhas de fusão devido a elevada velocidade de soldagem empregada para esta tocha.



**Figura 4.45.** Vista superior das chapas de aço submetidas à soldagem.

**Tabela 4.5.** Experimentos realizados com respectivos parâmetros de soldagem.

Parâmetros	Experimentos				
	1	2	3	4	5
$I_p - A$	60	60	60	60	60
$I_s - A$	200	200	200	200	250
Vazão do Gás – l/min	7	14	7	7	25
Velocidade de Soldagem – mm/s	1,7	1,7	3,4	1,7	1,7
Distância (bocal x peça) - mm	5	5	5	5	5
Tipo de Aço	AISI 304	AISI 304	AISI 304	AISI 304	SAE 1020
Dimensões das Chapas – mm	100x50x1,5	100x50x1,5	100x50x1,5	100x50x0,7	200x50x6,35

Os experimentos 1, 2 e 4 foram aqueles que apresentaram penetração completa. Também, todos os cordões de solda apresentaram grande oxidação devido a falta de um gás de proteção.

#### 4.3.2 Corte Térmico

Os cortes realizados com o dispositivo apresentaram irregularidades devido ao jato de plasma não ter força suficiente para expulsar o metal fundido, e chapas com espessuras acima de 3 mm não foram possíveis de cortar. A **Figura 4.46** mostra uma secção de uma chapa de aço AISI 304 com espessura de 1,5 mm cortada com a tocha híbrida geradora de plasma. O corte foi realizado com os seguintes parâmetros: intensidade de corrente elétrica primária de

60 A e secundária de 250 A; vazão do gás de 25 l/min; velocidade de corte de 8,4 mm/s; e distância do bocal à peça de 5 mm. Este corte apresenta um excesso de rebarbas, as quais foram formadas pela possível falta de força para expulsar o metal fundido.

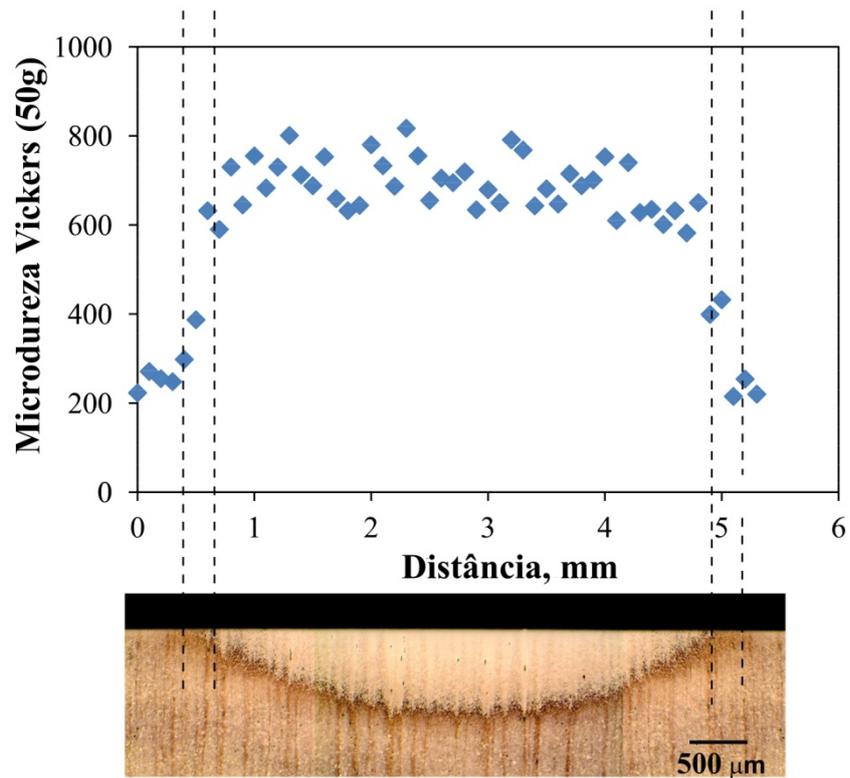


**Figura 4.46.** Vista lateral do corte de uma chapa de aço realizado com a tocha de plasma híbrida.

Para aumentar a eficiência do corte, possivelmente, um aumento da vazão do gás e das intensidades de corrente elétrica seria necessário, pois o metal fundido seria totalmente expulso com o aumento da vazão do gás e maiores velocidade de corte poderiam ser empregadas com o aumento das intensidades de corrente elétrica. Também, o aumento das intensidades de corrente elétrica poderiam possibilitar o corte de chapas com maiores espessuras.

#### *4.3.3 Endurecimento Superficial*

O resultado da aplicação do dispositivo em processo de endurecimento superficial poder ser observado através da **Figura 4.47**, onde é apresentado um gráfico da microdureza em função da distância da superfície de incidência do jato de plasma e uma macrografia da secção transversal da região tratada termicamente. Para este experimento, os seguintes parâmetros foram utilizados: intensidade de corrente elétrica primária de 60 A e secundária de 250 A; vazão do gás de 7 l/min; velocidade de deslocamento da tocha de 1,7 mm/s; distância do bocal à peça de 5 mm. A região alterada termicamente atingiu uma penetração e uma área de, aproximadamente, 0,74 mm e 2,06 mm<sup>2</sup>, respectivamente. A comprovação do endurecimento superficial foi obtida através da microdureza que, no metal base e na região tratada termicamente, apresentou valores médios de, aproximadamente, 250 Vickers e 700 Vickers, respectivamente.



**Figura 4.47.** Gráfico da microdureza em relação à distância da superfície de incidência do jato de plasma e macrografia da seção transversal da região tratada termicamente.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos e as análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Foi apresentado o projeto, a construção, a caracterização e a aplicação de uma tocha de plasma híbrida.
- As três variáveis (intensidades de corrente elétrica, primária e secundária, e vazão do gás) investigadas apresentaram influência significativa, com intervalo de confiança de 95%, sobre as seguintes variáveis físicas: curvas características,  $U \times I$ ; força propulsora resultante do jato de plasma; e comprimento do jato de plasma.
- A força propulsora resultante do jato de plasma expulso para fora da câmara aumenta com o aumento das intensidades de corrente elétrica, primária e secundária, e vazão. A intensidade de corrente elétrica secundária teve a maior influência sobre a força propulsora, seguida da vazão do gás, intensidade de corrente elétrica primária e interação entre essas variáveis.
- As intensidades de corrente elétrica (primária e secundária) e a vazão do gás causam alterações significativas no comprimento do jato de plasma. O comprimento do jato de plasma aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e sofre uma leve diminuição com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária. Aumentando a vazão do gás, de 7 l/min para 25 l/min, o comprimento do jato de plasma diminui.
- A intensidade de corrente elétrica primária tem influência significativa sobre a distribuição de temperatura, pois as distribuições de temperatura, para todos os experimentos realizados com a tocha de plasma operando com os dois arcos elétricos (primário e secundário) simultaneamente, apresentaram gradiente de temperatura na direção axial maiores quando comparados com os experimentos realizados com apenas um arco elétrico (secundário). O gradiente de temperatura na direção axial aumentou com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e da vazão do gás para os experimentos realizados com intensidades de corrente elétrica primária de 40 A e 50 A, intensidades de corrente elétrica secundária de 100 A, 150 A, 200 A e 250 A, e vazões do gás de 7 l/min, 14 l/min, 20 l/min e 25 l/min. Os outros experimentos apresentaram algumas irregularidades na formação da distribuição de

temperatura, isto é, a variação dos gradientes de temperaturas na direção axial não foi uniforme.

- O maior valor de temperatura para os jatos de plasma expulso para fora da câmara foi de, aproximadamente, 7800 °C. Esta temperatura foi observada numa região localizada perto da saída do anodo secundário, com a tocha de plasma híbrida operando com intensidades de corrente elétrica, primária de 40 A e secundária de 250 A, e vazão do gás de 25 l/min.
- A tensão primária apresentou os seguintes comportamentos: diminui (leve queda) com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária; aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária de 150 A à 250 A; quase não varia para as vazões de gás de 7 l/min, 14 l/min e 20 l/min; e aumenta para uma vazão de gás de 25 l/min. A tensão secundária quase não varia com a com o aumento da intensidade de corrente elétrica primária, diminui com o aumento da intensidade de corrente elétrica secundária e aumenta com o aumento da vazão do gás. As tensões, primária e secundária, aumentam como o aumento da vazão do gás.
- Em relação aos sinais elétricos, a corrente elétrica primária apresenta uma forma de onda dente de serra e a tensão apresenta uma forma de onda irregular. As oscilações de tensão primária foram irregulares devido ao movimento descontrolado do arco elétrico primário. A forma de onda encontrada para a corrente elétrica e tensão secundária são semelhantes, isto é, ambas apresentaram forma de meia onda senoidal devido ao método de retificação da fonte secundária (retificador com controle eletrônico de saída). O aumento e a diminuição da tensão secundária em função do tempo correspondem aos deslocamentos do arco elétrico secundário na direção do fluxo de plasma e na direção contrária ao fluxo de plasma, respectivamente. O modo de operação do arco secundário pode ser caracterizado como “takeover”.
- As amplitudes espectrais para os sinais de tensão primária e secundária em função da frequência para diferentes vazões de gás apresentaram pico predominante de 180 Hz e harmônico de 360 Hz em todos os espectros. Com isso, a frequência dominante foi originada da típica ondulação retificada trifásica.
- O dispositivo mostrou-se capaz de realizar soldagem de chapas finas com vazões de gás iguais ou menores que 7 l/min, pois com vazões acima de 7 l/min o jato de plasma tornava-se turbulento e formava cordões de solda irregulares.

- Os cortes realizados com o dispositivo apresentaram irregularidades devido ao jato de plasma não ter força suficiente para expulsar o metal fundido, e chapas com espessuras acima de 3 mm não foram possíveis de cortar.
- A tocha de plasma híbrida pode ser empregada para realização de endurecimento superficial.

## 6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos, os seguintes estudos podem ser realizados:

- Estudar os efeitos de diferentes distâncias entre os eletrodos sobre o jato de plasma, pois estas distâncias podem ter influência sobre a estabilidade dos arcos elétricos e sobre a tensão elétrica, a qual está diretamente relacionada com a energia gasta no funcionamento da tocha de plasma híbrida.
- Aplicar diferentes geradores de campo magnético externo (bobinas, imãs, entre outros) sobre a tocha de plasma híbrida e estudar os efeitos causados pelos mesmos nos jatos de plasma;
- Estudar os efeitos de diferentes gases (H, He, N, etc.) sobre o jato de plasma gerado pela tocha;
- Caracterizar o dispositivo quanto ao rendimento térmico;
- Desenvolver modelos computacionais que descrevam as características elétricas, fluidodinâmicas e térmicas do jato de plasma. Estes modelos poderão auxiliar na elaboração e construção de novos eletrodos e constituintes da tocha (câmaras de refrigeração, câmaras de ionização, etc.) que proporcionarão o melhor funcionamento da tocha, isto é, tornar o arrefecimento da tocha mais eficiente, maior controle sobre o jato de plasma e estabilidade dos arcos elétricos poderão ser alcançados.
- Otimizar os processos de soldagem e/ou corte de diferentes materiais realizados com o presente dispositivo, adicionando ou não metal de adição, e comparar com os processos convencionais (plasma, TIG, LASER, entre outros);
- Aplicar a tocha de plasma híbrida em processos de aspersão térmica, pois o jato de plasma gerado pela tocha é característico destes processos. Isto pode ser realizado com pequenas alterações na tocha de plasma híbrida, isto é, basta construir um anodo secundário que tenha entrada para adição de pó. Também, para esta aplicação, um sistema alimentador de pó deverá ser utilizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI KETTANI, M.; HOYAUX, M. F. **Plasma Engineering**. First ed., London Butterworths, 1973.
- ANGELES, P. J. P., **Estudo de Tochas de Plasma através da Teoria da Similaridade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2003.
- AWS., **Welding Handbook - Welding Process**. 8nd. ed., American Welding Society, v. II, Miami, 1991.
- BARRETO, P. R. P., **Desenvolvimento de uma Tocha de Plasma de Baixa Potência para Sintetização de Filmes de Diamante**. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 1998.
- BATCHELOR, G. K. **An Introduction to Fluid Dynamics**. Cambridge University Press, 2000.
- BAUCHIRE, J. M.; BERTRAND, E. L.; IZARRA, C. Numerical Modelling of a Free-Burning Arc in Argon. A Tool for Understanding the Optical Mirage Effect in a TIG Welding Device. **Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference**, Milan, 2009.
- BEJAN, A. **Heat Transfer**. Wiley, 1993.
- BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G., Optimization of Different Welding Processes Using Statistical and Numerical Approaches – A Reference Guide. **Advances in Engineering Software**, v. 39, p. 483-496, 2008.
- BITTENCOURT, J. A., **Fundamentals of Plasma Physics**. Pergamon, Oxford, 1986.
- BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P.; E PFENDER, E., **Thermal Plasma: Fundamentals and Applications**. Plenum Press, v. 1, New York, 1994.
- BROWNING, J. A., **Hybrid Non-Transferred-Arc Plasma Torch System and Method of Operating Same**. 4,626,648, 2 December 1986.
- BURTON, R. L.; CLARK, K. E.; JAHN, R. G., Measured Performance of the Multimegawatt MPD Thruster. **Journal Spacecraft and Rockets**, v. 20, n. 3, May/June, 1983.
- CAP, F. F. **Handbook on Plasma Instabilities**. Academic Press, INC, New York, 1976.

CHEN, F. F. **Plasma Physics and Controlled Fusion – Volume 1: Plasma Physics**. Plenum Press, Second ed., New York, 1984.

CHEN, H.; YANG, J.; LI, H., Microstructure and Properties of Fe-based Coatings on Cutting Pick Surface Formed by Plasma Jet Surface Metallurgy. **Transaction Nonferrous Metals Society of China**, v. 19, p. 583-586, 2009.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 7. ed., 2002.

CHOUERI, E. Y. A Critical History of Electric Propulsion: The First Fifty Years. **Journal of Propulsion and Power**, v. 20, n. 2, p. 193 – 203, March/April, 2004.

CHUMAK, O.; KAVKA, T.; HRABOVSKÝ, M. Characterization of Plasma Jet Structure and Fluctuations by Statistic Processing of Photographic Images. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 36, n. 4, August, 2008.

COUTINHO, A. C. **Pirólise do Gás Natural Utilizando uma Tocha de Plasma de Arco Não-Transferido com Argônio como Gás de Trabalho**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, 2007.

EL RAYES, M.; WALZ, C.; SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. **Welding Journal**, v. 83, n. 5, May, 2004.

ESIBYAN, E. M., **Plasma-Arc Equipment**. Mir Publishers, Moscou, 1973.

ESSERS, W.G.; WILLEMS, G.A.M.; BUELENS, J.J.C.; VAN GOMPEL, M.R.M., Plasma-MIG Welding – A New Torch and Arc Starting Method. **Metal Construction**, January 1981.

GALLO, C. F. Corona – A Brief Status Report. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-13, n. 6, November/December, 1977.

GROSS, B.; CRYRZ, B.; MIKLOSSY, K., **Plasma Technology**. Tchecoslováquia: Iliffe Book LTD London, 1968.

GUILE, A. E. Arc Electrode Phenomena. **IEE Review**, v. 118, p. 1131-1154, 1971.

HOYAUX, M. F. **Arc Physics**. Springer-Verlag, New York, 1968.

HUANG, R. S.; LIU, L.; SONG, G. Infrared Temperature Measurement and Interference Analysis of Magnesium Alloys in Hybrid LASER-TIG Welding Process. **Materials Science and Engineering A**, v. 447, p. 239-243, 2007.

- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, 4th Edition. ed., 1996.
- IZARRA, C.; M., G. J. Calibration and Temperature Profile of a Tungsten Filament Lamp. **European Journal of Physics**, v. 31, p. 933-942, 2010.
- JAHN, R. G., **Physics of Electric Propulsion**. McGraw-Hill Company, New York, 1968.
- JAHN, R. G.; CHOUERI, E. Y., **Electric Propulsion**. Academic Press Encyclopedia of Physical Science & Technology, 3rd Edition, v. 5, 2002.
- KOU, S. **Welding Metallurgy**. John Wiley & Sons, INC, 2nd Edition, 2002.
- KRAUSS, G. **Principles of Heat Treatment of Steels**. ASM, Metals Park, Ohio, 1980.
- LAKSHMINARAYANAN, A. K.; BALASUBRAMANIAN, V. Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 18, p. 548-554, 2008.
- LANCASTER, J. F., **The Physics of Welding**. Pergamon Press, 2nd Edition, 1986.
- LANDES, K. Diagnostics in Plasma Spraying Techniques. **Surface & Coatings Technology**, v. 201, p. 1948-1954, 2006.
- LERMEN, R. T.; MACHADO, I. G. Prospecção de Novas Tecnologias nos Processos de Soldagem e Corte. **Soldagem & Inspeção**, v. 11, n. 3, Julho/Setembro, 2006.
- LIU, Y. Research on Temperature Measurement of High Voltage Circuit Breaker Arc Extinguish Chamber. **International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment - ICEEE**, 2010.
- MACHADO, I. G.; LERMEN, R. T. Development and Implementation of a Magnetoplasmadynamic Thruster for Welding and Cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, p. 398-404, 2008.
- MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas – Processos**. Editado pelo Autor, Distribuido pela Associação Brasileira de Soldagem, Porto Alegre, 1996.
- MAECKER, H. Plasma Jets in Arcs in a Process of Self-Induced Magnetic Compression. **Z. Physics**, v. 141, n. 1, p. 198-216, 1955.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.

- MARROTA, A. Tochas de Plasma: Questões Básicas. **Congresso Brasileiro de Física dos Plasmas**. Santos, p. 228-241, 1991.
- MESSLER, R. W. J. What's Next for Hybrid Welding. **Welding Journal**, v. 83, n. 3, p. 30-34, March, 2004.
- METALS HANDBOOK, **Heat Treating**. American Society for Metals, 10nd Edition, v. 4, 1990.
- MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Editado pelo Autor, Belo Horizonte, 2011.
- MONTGOMERY, D. C., **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- MURPHY, A. B.; TANAKA, M.; YAMAMOTO, K.; TASHIRO, S.; SATO, T.; LOWKE, J. J. Modelling of Thermal Plasmas for Arc Welding: The Role of the Shielding Gas Properties and of Metal Vapour. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, 2009.
- NICHOLSON, D. R. **Introduction to Plasma Theory**. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- OLIVEIRA, M. A., **Desenvolvimento do Processo de Soldagem Híbrido Plasma-MIG para Operações de Soldagem e Brasagem**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006.
- PAN, W.; ZHANG, W.; MA, W.; WU, C. Characteristics of Argon Laminar DC Plasma Jet at Atmospheric Pressure. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 22, n. 2, June, 2002.
- PAN, W. X.; MENG, X.; LI, G.; FEI, Q. X.; WU, C. K. Feasibility of Laminar Plasma-Jet Hardening of Cast Iron Surface. **Surface & Coatings Technology**, 2005.
- PFENDER, E., **Electric Arcs and Arc Gas Heaters**. Academics Press, v. 1, 1978.
- RAIZER, Y. P., **Gas Discharge Physics**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
- RAVARY, B.; FULCHERI, L.; FLAMANT, G.; FABRY, F. Analysis of a 3-phase AC Plasma Process. **Journal of High Temperature Material Processes**, v. 3, n. 2, p. 245-260, 1998.
- RENIER, E.; MERIAUDEAU, F.; SUZEAU, P.; TRUCHETET, F. CCD Temperature Imaging: Applications in Steel Industry. **IEEE**, 1996.

RESENDE, A. A.; FERRARESI, V. A.; SCOTTI, A.; DUTRA, J. C. Influência das Correntes de Soldagem do Processo Plasma-MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda e Taxa de Fusão do Arame. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 4, p. 320-328, São Paulo, Outubro/Dezembro, 2009.

ROTH, J. R., **Industrial Plasma Engineering - Volume 1: Principles**. Institute of Physics Publishing, v. 1, Philadelphia, 1995.

SANKARAN, K., **Simulation of Plasma Flows in Self-Field Lorentz Force Accelerators**. PhD Thesis. Princeton University, 2005.

SEGOVIA, A.; PACHECO, J.; ROMÁN, B.; COTA, G.; LONGORIA, C. Heat Power Measurement in a Thermal Plasma Process. **Instrumentación y Desarrollo**, v. 3, October, 1998.

SOLOMONENKO, O. P. **Thermal Plasma Torches and Technologies**. Cambridge International Science Publishing, 2003.

TIKHONOV, V. B.; SEMENIHIN, S. A. Research on Plasma Acceleration Processes in Self-Field and Applied Magnetic Field Thrusters. **23rd International Electric Propulsion Conference**. Seattle, 1993.

TILLACK, M. S.; MORLEY, N. B., **Magneto-Hydrodynamic**. McGraw Hill Standard Handbook for Electrical Engineers, 14. ed., 1998.

TRELLES, J. P.; CHAZELAS, C.; VARDELLE, A.; HEBERLEIN, J. V. R. Arc Plasma Torch Modeling. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 18, n. 5-6, p. 728-752, December, 2009.

TU, X.; CHÉRON, B.G.; YAN, J.H.; CEN, K.F. Dynamic Behaviour of DC Double Anode Plasma Torch at Atmospheric Pressure. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 40, p. 3972-3979, 2007.

TU, X.; CHÉRON, B.G.; YAN, J.H.; CEN, K.F. Electrical and Spectroscopic Diagnostic of an Atmospheric Double Arc Argon Plasma Jet. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 16, p. 803-812, 2007.

TU, X.; CHÉRON, B. G.; YAN, J. H.; YU, L.; CEN, K. F. Characterization of an Atmospheric Double Arc Argon-Nitrogen Plasma Source. **Physics of Plasmas**, v. 15, 2008.

TU, X.; YU, L.; YAN, J.; CEN, K.; CHÉRON, B. Heat Flux Characteristics in an Atmospheric Double Arc Argon Plasma Jet. **Applied Physics Letters**, v. 93, 2008.

VENKATRAMANI, N. Industrial Plasma Torches and Applications. **Current Science**, v. 83, n. 3, p. 254-262, August, 2002.

VERÁSTEGUI, R. N. **Análise da Refusão Superficial de Aços por LASER com Altas Taxas de Resfriamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WEIDONG, X.; FULCHERI, L.; AGUILAR, J. G.; HUI, L.; GRUENBERGER, T.M. Characterization of a 3-Phase a.c. Free Burning Arc Plasma. **Plasma Science & Technology**, v. 8, n. 2, March, 2006.

WUA, C.; PAN, P. Unsteadiness in Non-Transferred DC Arc Plasma Generators. **Theoretical & Applied Mechanics Letters**, v. 2, 2011.

XU, C.; GAO, H.; WU, L. Application of Monochromatic Image Method in Arc Plasma Diagnostics. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 33, n. 2, April, 2005.

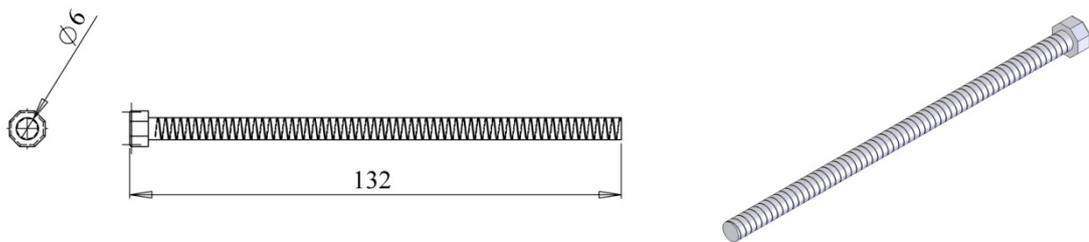
YAN, J.; LI, W. Research on Colorimetric Temperature-measurement Method Improved Based on CCD Imaging. **IEEE 3rd International Congress on Image and Signal Processing**, 2010.

YAO, Y.; HOSSAIN, M.M.; WATANABE, T.; MATSUURA, T.; FUNABIKI, F.; YANOC, T. A Multi-phase AC Arc Discharge and its Application in In-Flight Thermal Treatment of Raw Glass Powders. **Chemical Engineering Journal**, v. 139, p. 390-397, 2008.

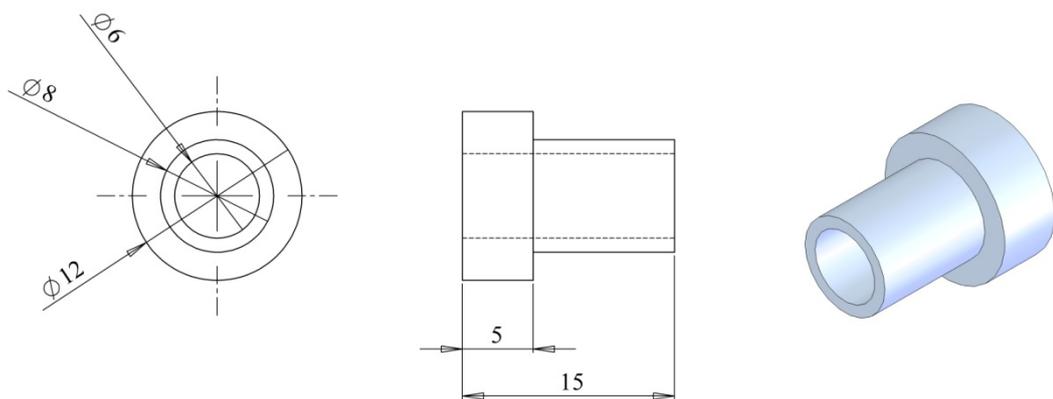
ZHUKOV, M. F.; ZASYPKIN, I. M., **Thermal Plasma Torches - Design, Characteristics, Applications**. Cambridge International Science Publishing, 2007.

## ANEXO A

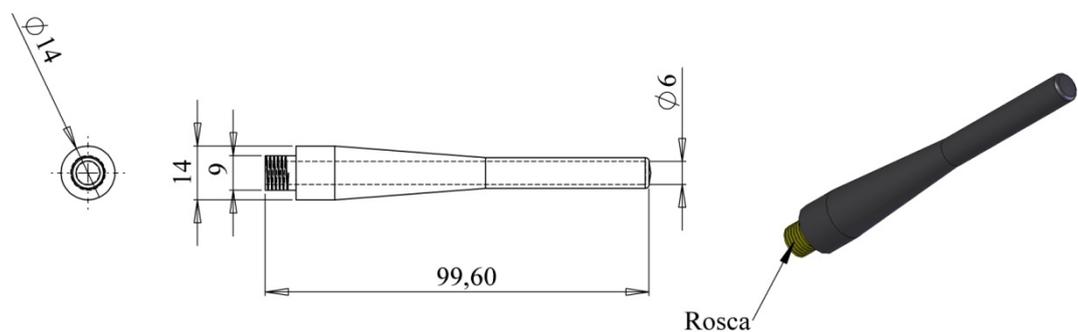
As Figuras a seguir apresentam os componentes da tocha de plasma híbrida, os quais foram apresentados anteriormente através da **Figura 3.5**, com suas respectivas dimensões.



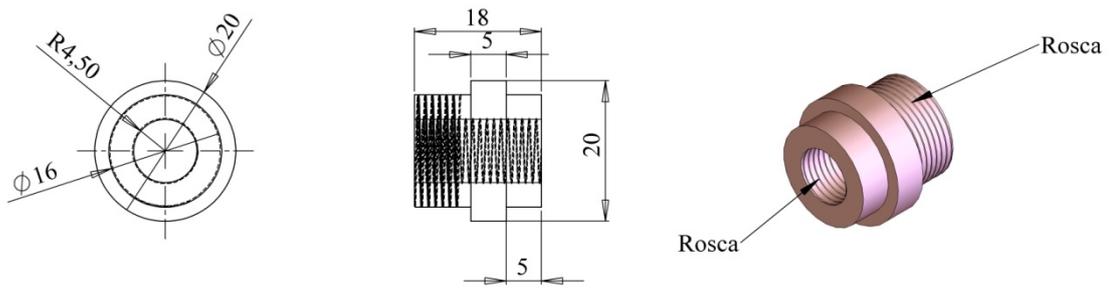
**Figura A.1.** Parafuso.



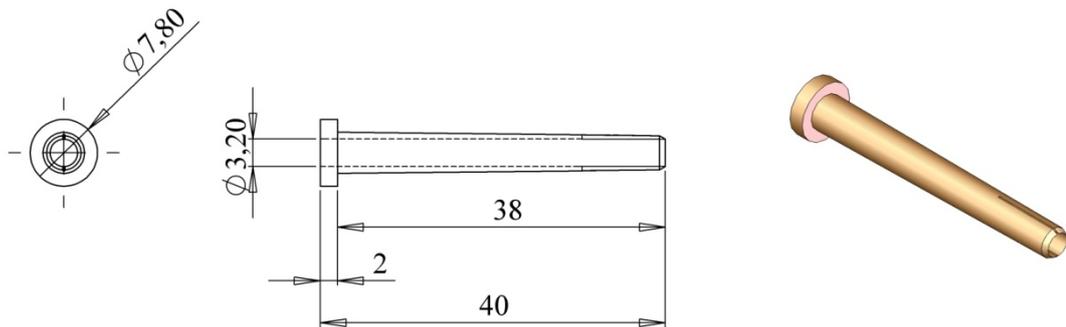
**Figura A.2.** Bucha isolante.



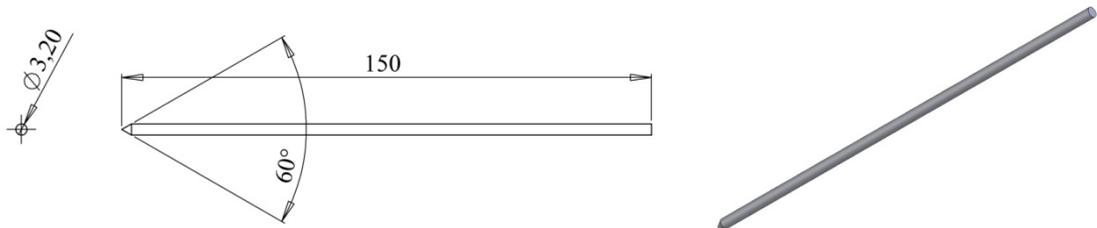
**Figura A.3.** Capa longa.



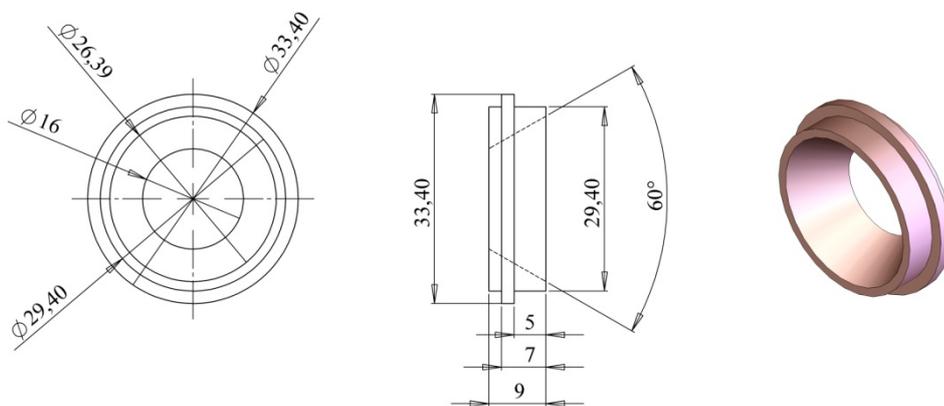
**Figura A.4.** Corpo fixador.



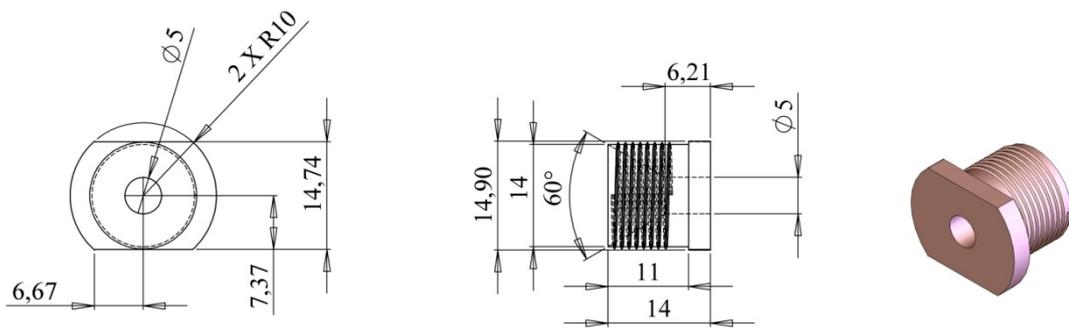
**Figura A.5.** Pinça.



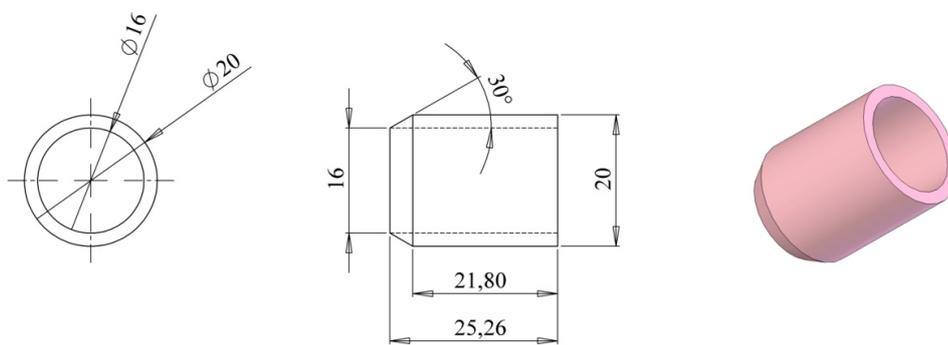
**Figura A.6.** Catodo secundário.



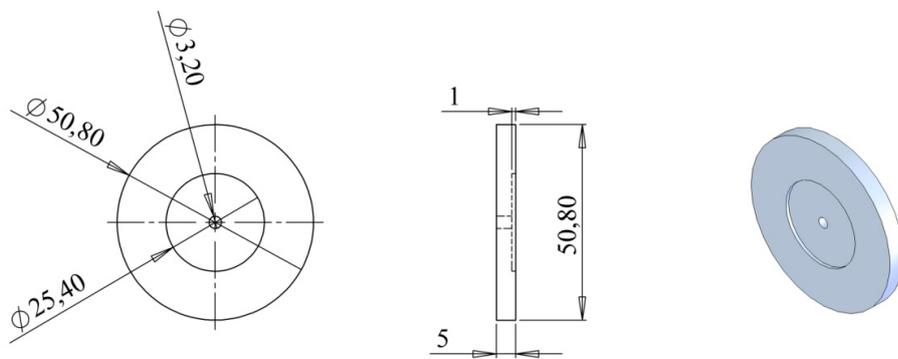
**Figura A.7.** Anodo primário.



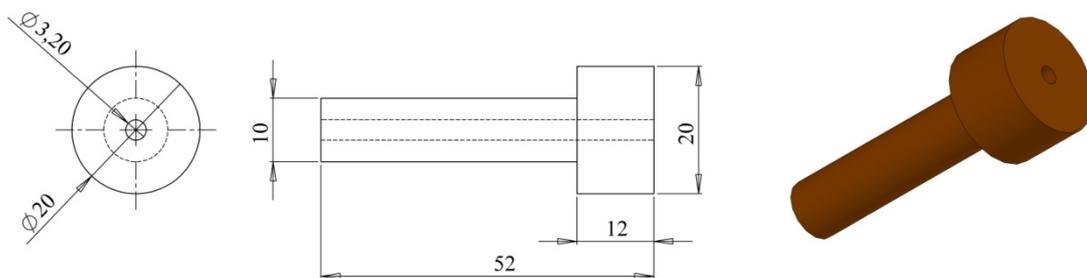
**Figura A.8.** Anodo secundário.



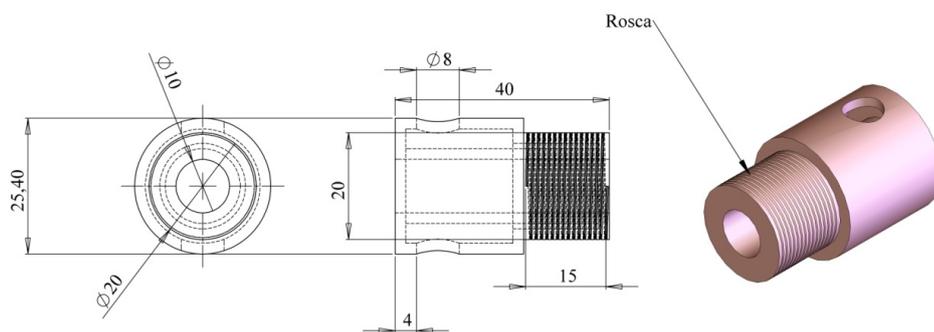
**Figura A.9.** Bocal cerâmico.



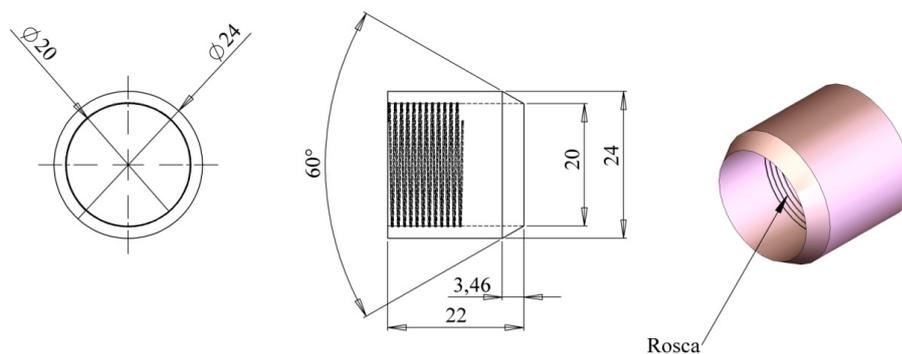
**Figura A.10.** Bolacha isolante.



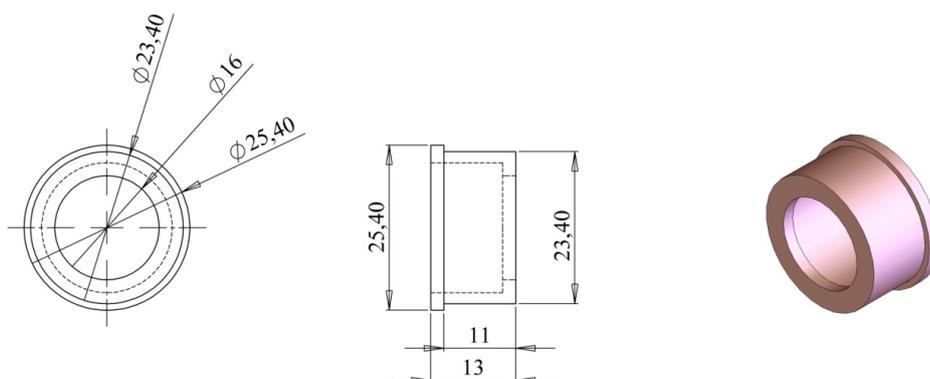
**Figura A.11.** Bucha cerâmica.



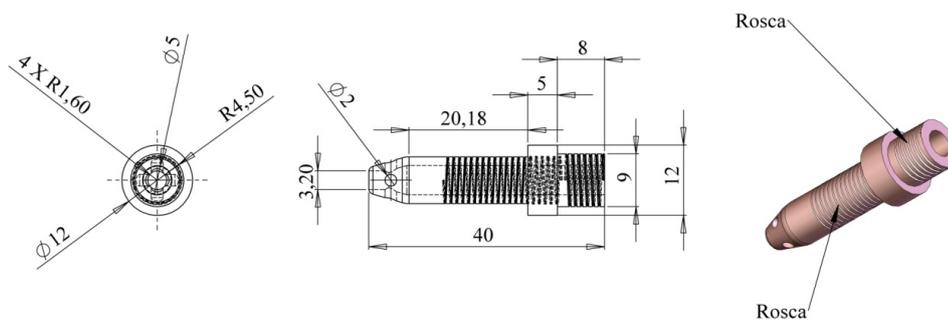
**Figura A.12.** Câmara de refrigeração catodo primário.



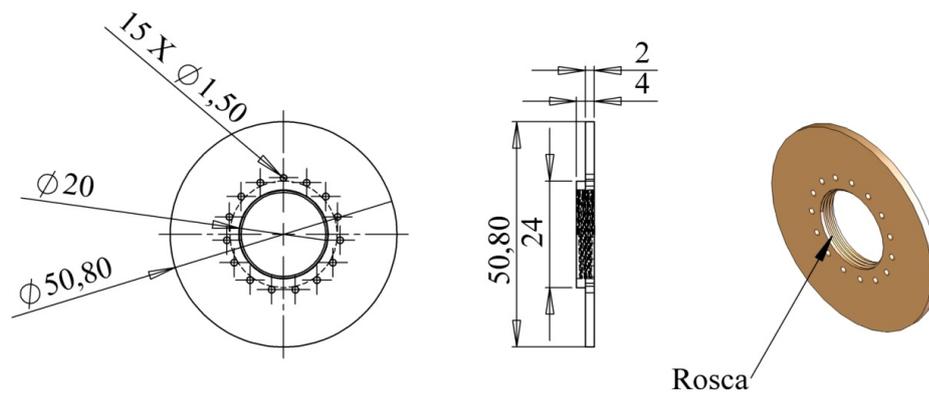
**Figura A.13.** Catodo primário.



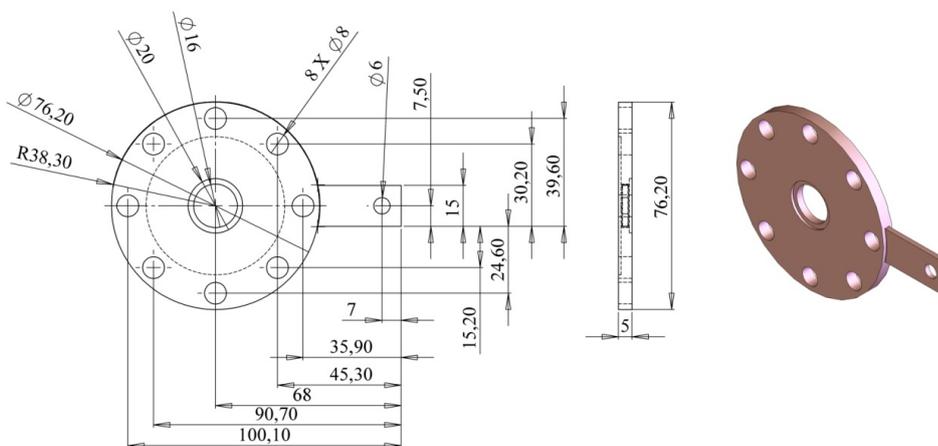
**Figura A.14.** Bucha fixadora do bocal cerâmico.



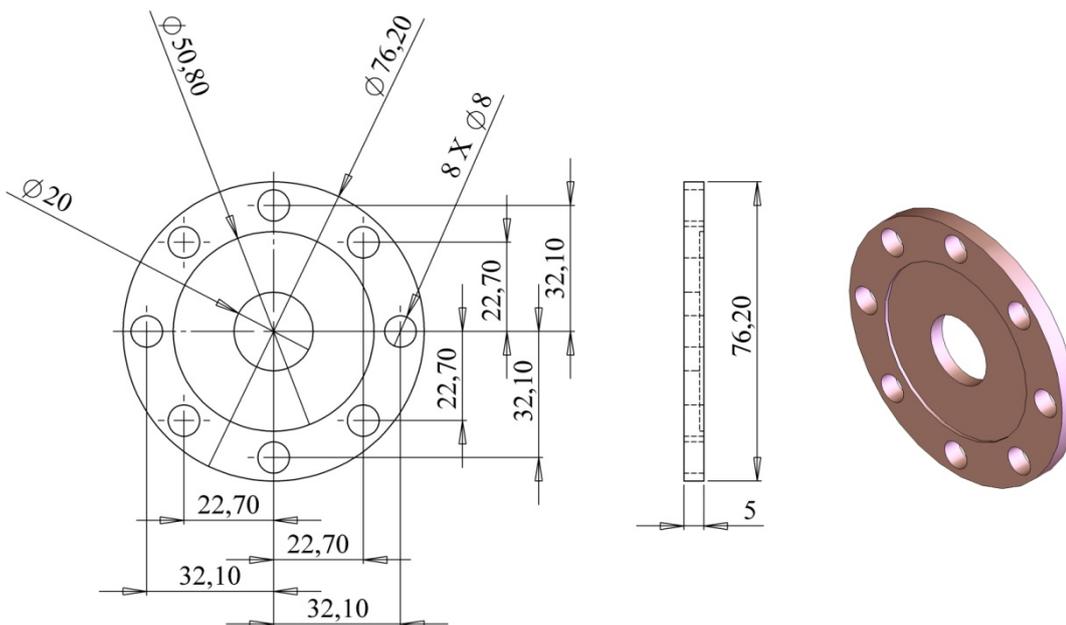
**Figura A.15.** Difusor fixador para o catodo secundário.



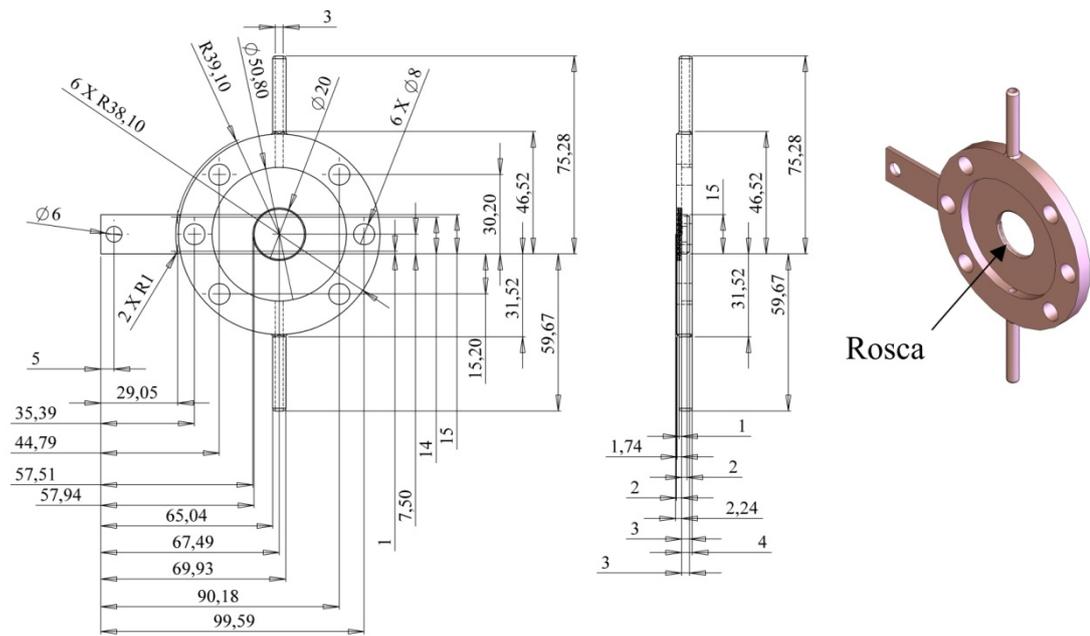
**Figura A.16.** Difusor de gás.



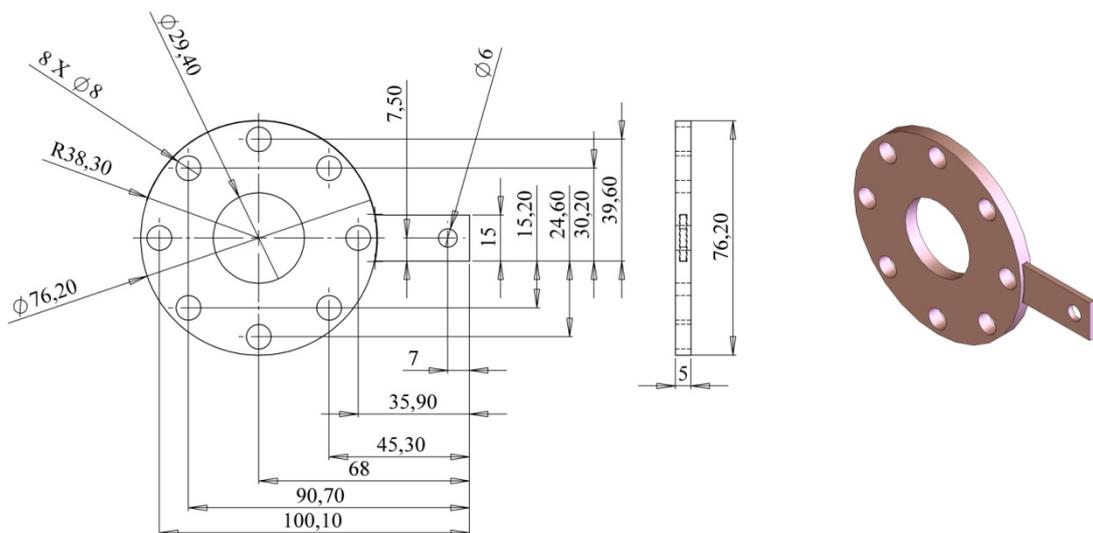
**Figura A.17.** Flange fixador para a câmara de refrigeração do cátodo secundário.



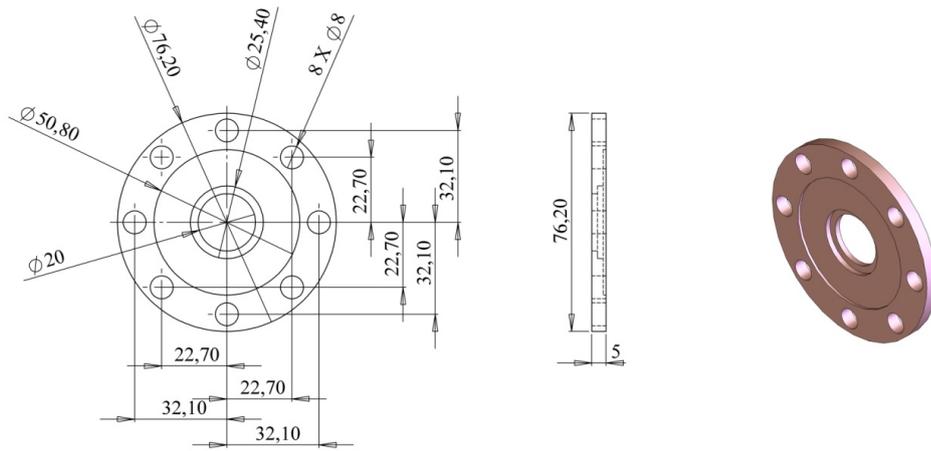
**Figura A.18.** Flange fixador (23).



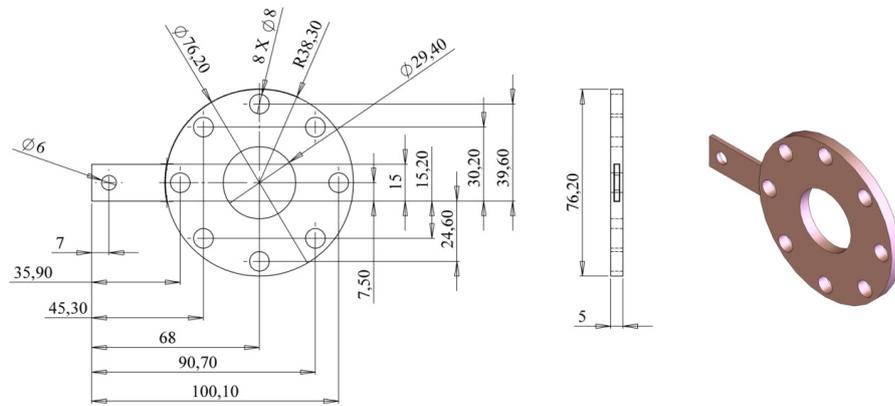
**Figura A.19.** Flange fixador com entrada de gás, com conector de energia e com conexão para câmara de refrigeração do cátodo primário.



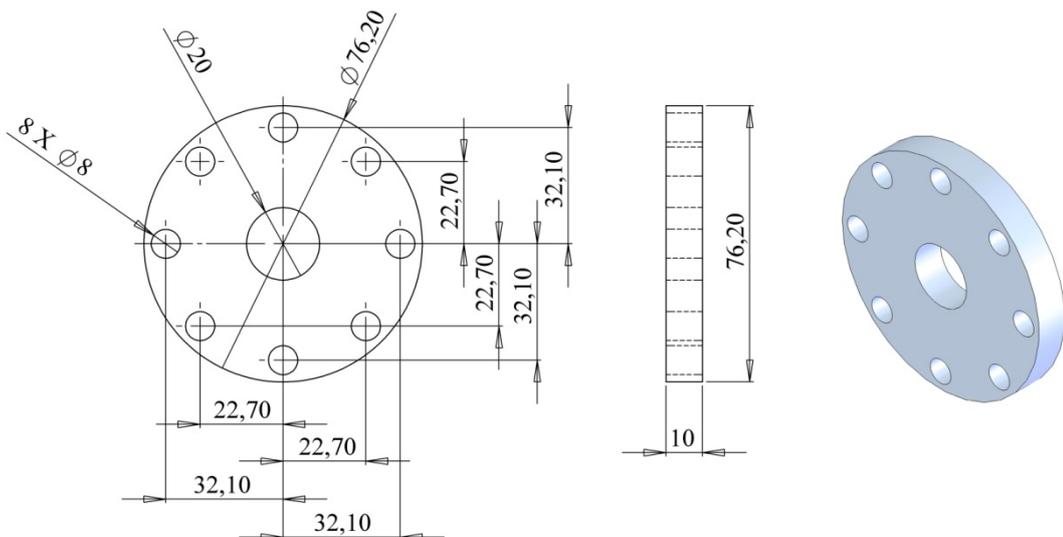
**Figura A.20.** Flange fixador anodo primário.



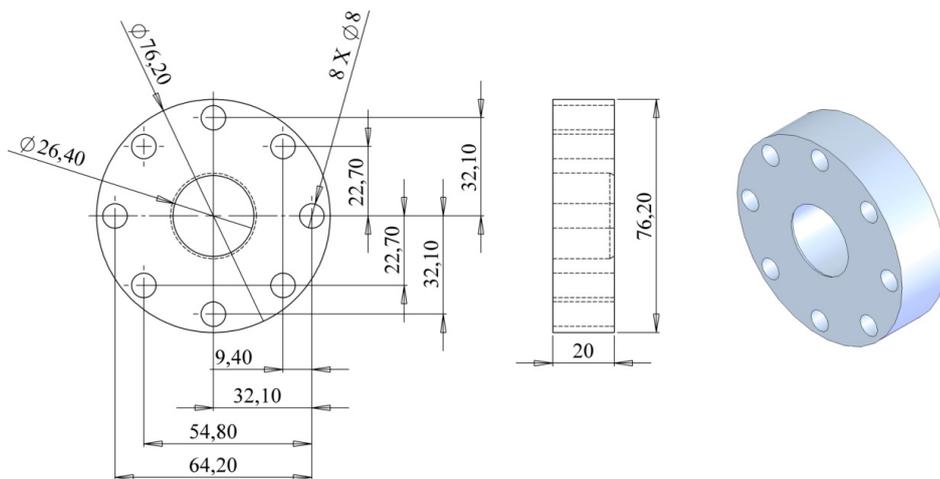
**Figura A.21.** Flange fixador para câmara de refrigeração do anodo primário.



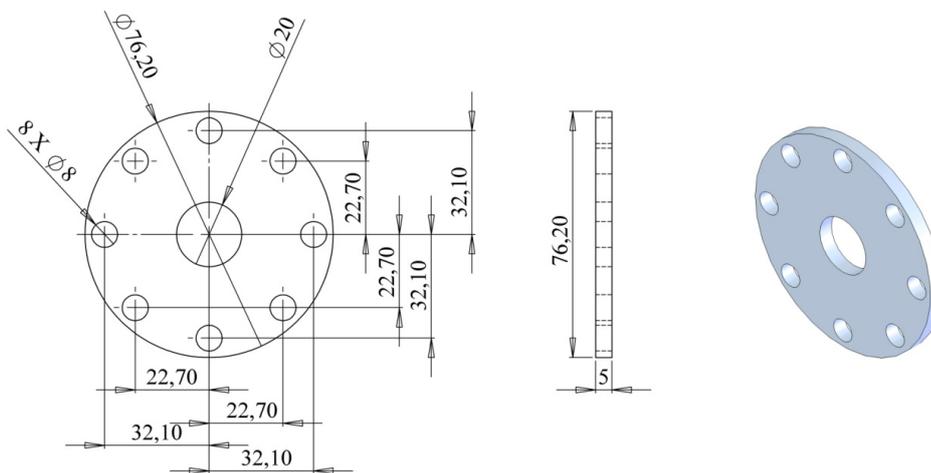
**Figura A.22.** Flange fixador para a câmara de refrigeração do anodo secundário.



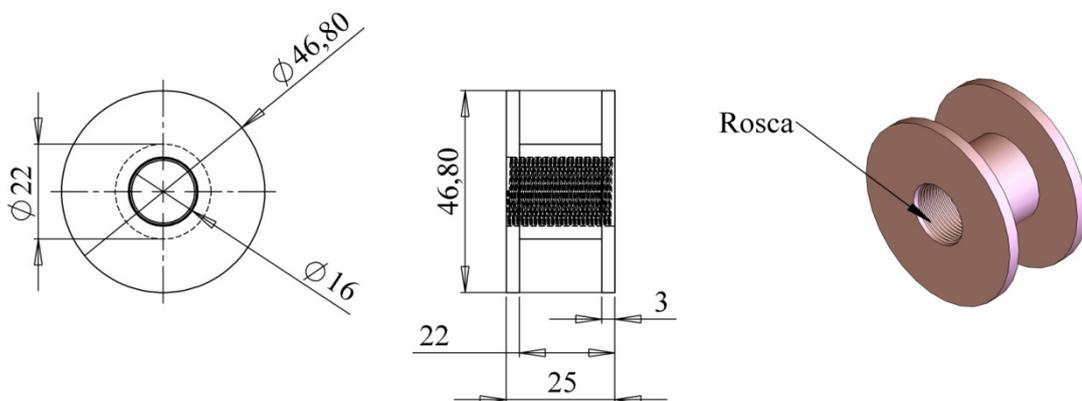
**Figura A.23.** Flange isolante utilizado para o isolamento elétrico entre os catodos, secundário e primário.



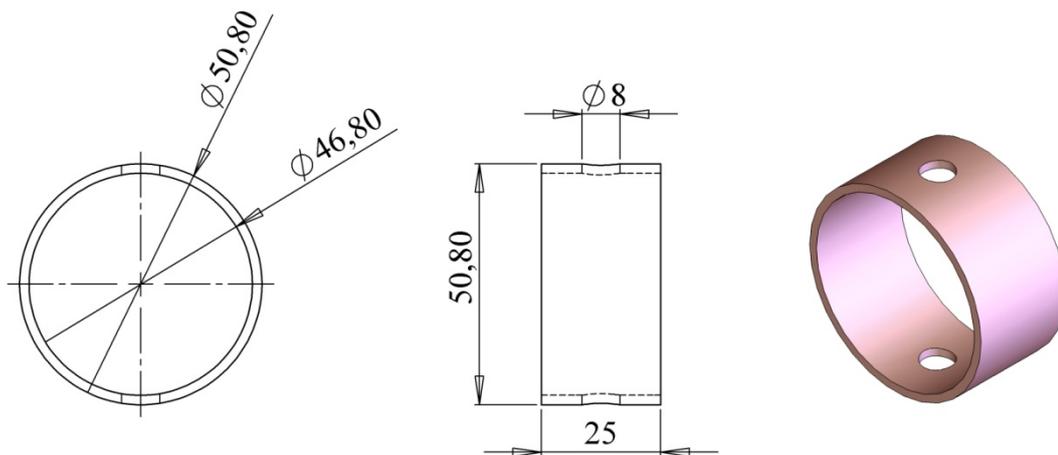
**Figura A.24.** Flange isolante utilizado para isolamento elétrico entre o catodo primário e anodo primário.



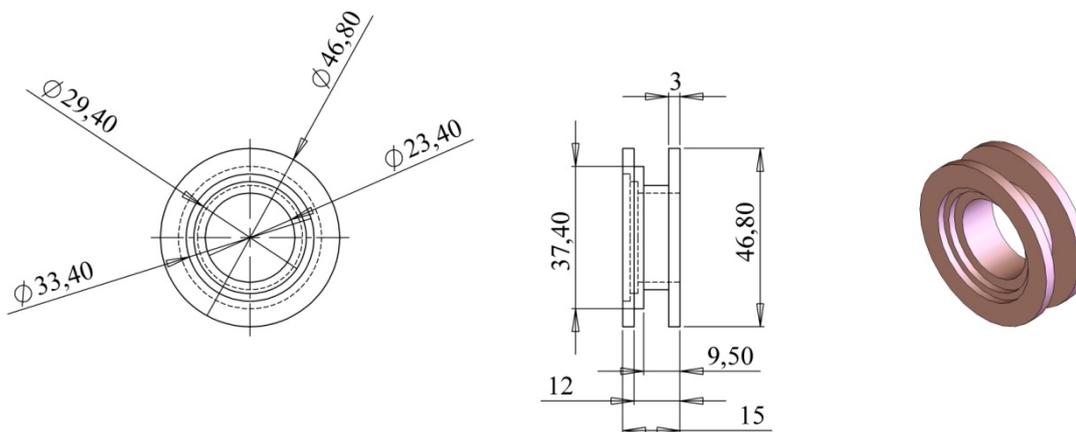
**Figura A.25.** Flange isolante utilizado para isolamento elétrico entre os anodos, primário e secundário.



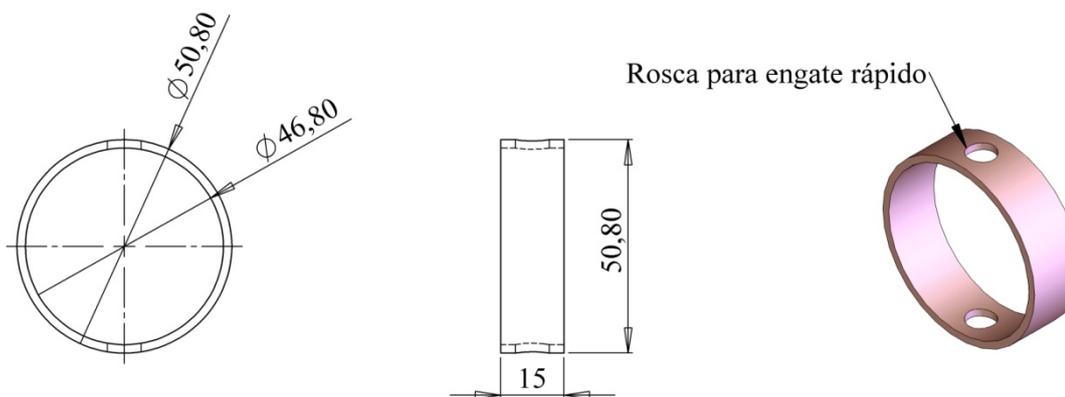
**Figura A.26.** Peça I da câmara de refrigeração para o catodo secundário



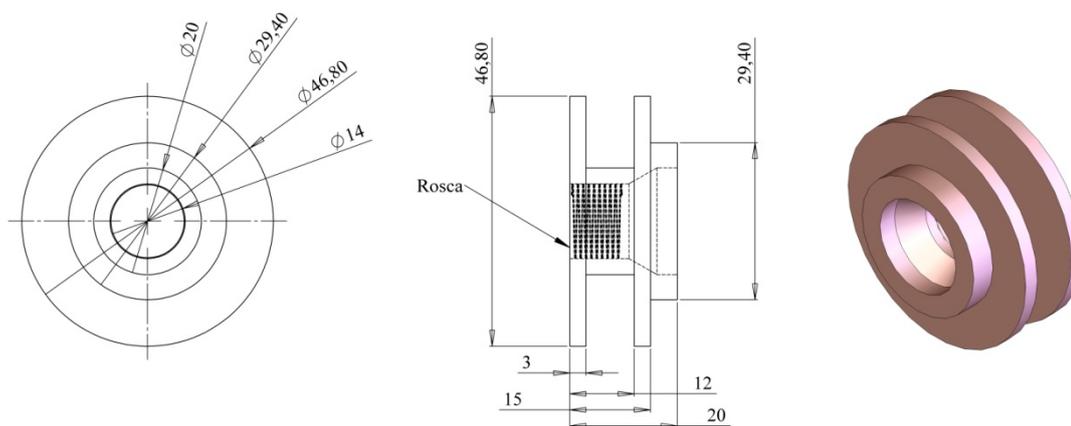
**Figura A.27.** Peça II da câmara de refrigeração para o catodo secundário.



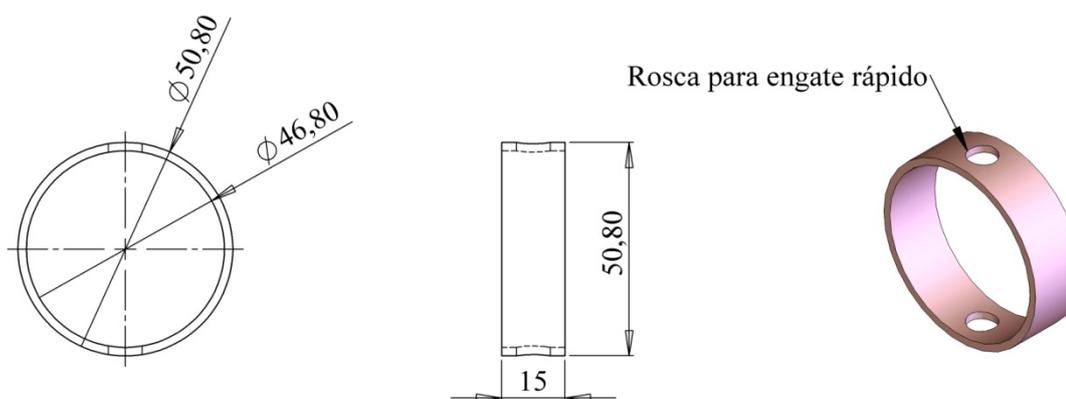
**Figura A.28.** Peça I da câmara de refrigeração para o anodo primário.



**Figura A.29.** Parte II da câmara de refrigeração para o anodo primário.



**Figura A.30.** Parte I da câmara de refrigeração para o anodo secundário.

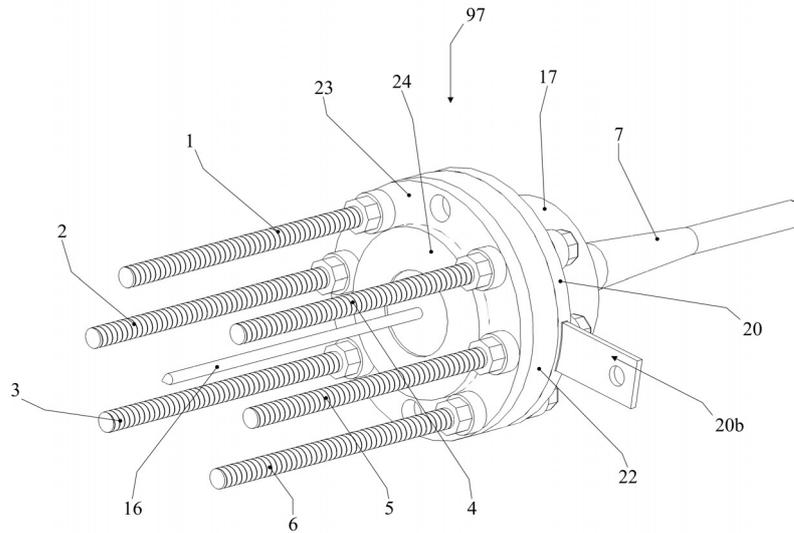


**Figura A.31.** Parte II da câmara de refrigeração para o anodo secundário.

A montagem da tocha, conforme a numeração apresentada na **Figura 3.5**, segue às seguintes sequências:

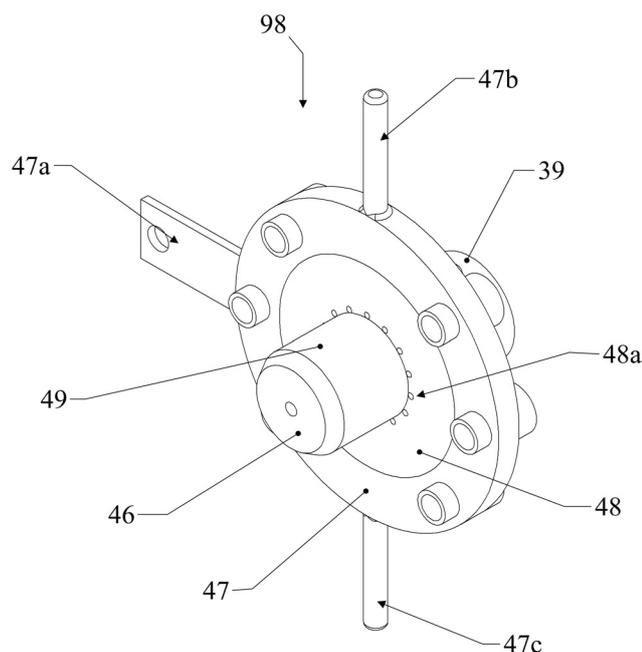
I. O flange fixador (20) é anexado à câmara de refrigeração (17) através de pontos de solda, formando um corpo único. Um corpo fixador (8) é unido por uma rosca (8a) à câmara de refrigeração (17). O difusor (21) é preso ao corpo fixador (8) e, sequencialmente, o catodo secundário (16) é introduzido no interior da pinça (15), que por sua vez, é introduzida dentro do difusor (21). A capa longa (7) é inserida através de uma rosca (7a) ao corpo fixador (8), onde a mesma (7) pressiona a pinça (15) contra o difusor (21) prendendo o catodo secundário (16). As buchas isolantes (9) (10) (11) (12) (13) (14) são introduzidas nos orifícios do flange fixador (20), onde, posteriormente, são introduzidos os parafusos (1) (2) (3) (4) (5) (6). O flange isolante (22) e o flange fixador (23) são unidos ao corpo formado anteriormente e presos pelas buchas (25) (26) (27) (28) (29) (30) e porcas (31) (32) (33) (34) (35) (36). A

bolacha isolante (24) é encaixada junto ao flange fixador (23). Com isto e conforme indicado pela **Figura A.32**, o primeiro conjunto de peças (97) da tocha é constituído.



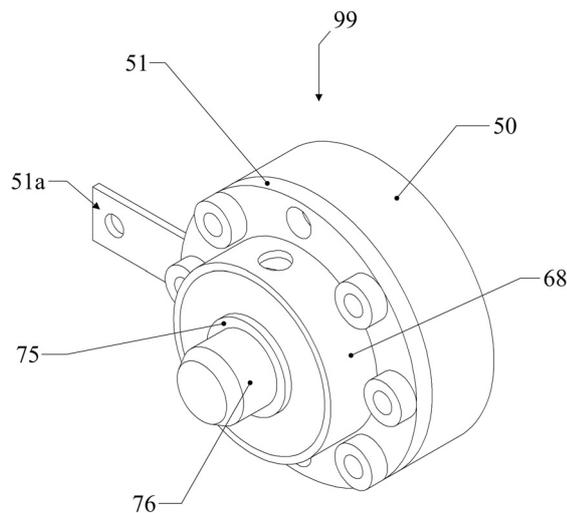
**Figura A.32.** Conjunto I de peças montadas da tocha de plasma.

II. A câmara de refrigeração (39), o flange fixador (47), o difusor (48) e o catodo primário (49) são unidos através de roscas (39b) (47e) (48b) (49b) formando um único corpo. As buchas isolantes (40) (41) (42) (43) (44) (45) são adicionadas ao flange fixador (47). Por fim, o isolante cerâmico (46) é introduzindo sob pressão no interior (39a) da câmara de refrigeração (39). A **Figura A.33** mostra a o conjunto de peças (98) formado por esta sequência de montagem.



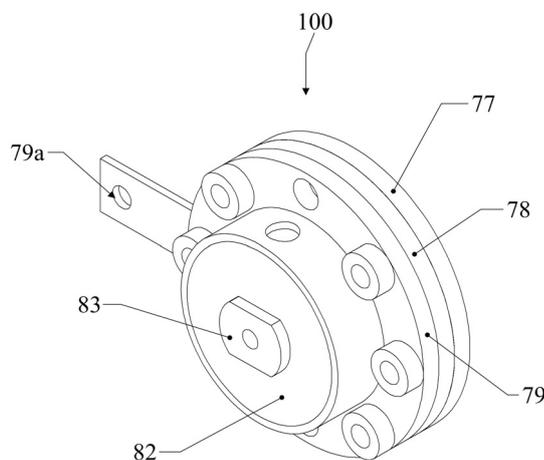
**Figura A.33.** Conjunto II de peças montadas da tocha de plasma.

III. O anodo primário (65) é encaixado, sob pressão, entre a câmara de refrigeração (68) e o flange fixador (51). O bocal cerâmico (76) em forma de câmara é unido à câmara de refrigeração (68) através uma peça fixadora (75). As buchas isolantes (52) (53) (54) (55) (56) (57) são adicionadas aos orifícios do flange fixador (51), no qual o flange isolante (50) é fixado também. O conjunto de peças (99) formado nesta sequência de montagem pode ser visto através da **Figura A.34**.



**Figura A.34.** Conjunto III de peças montadas da tocha de plasma.

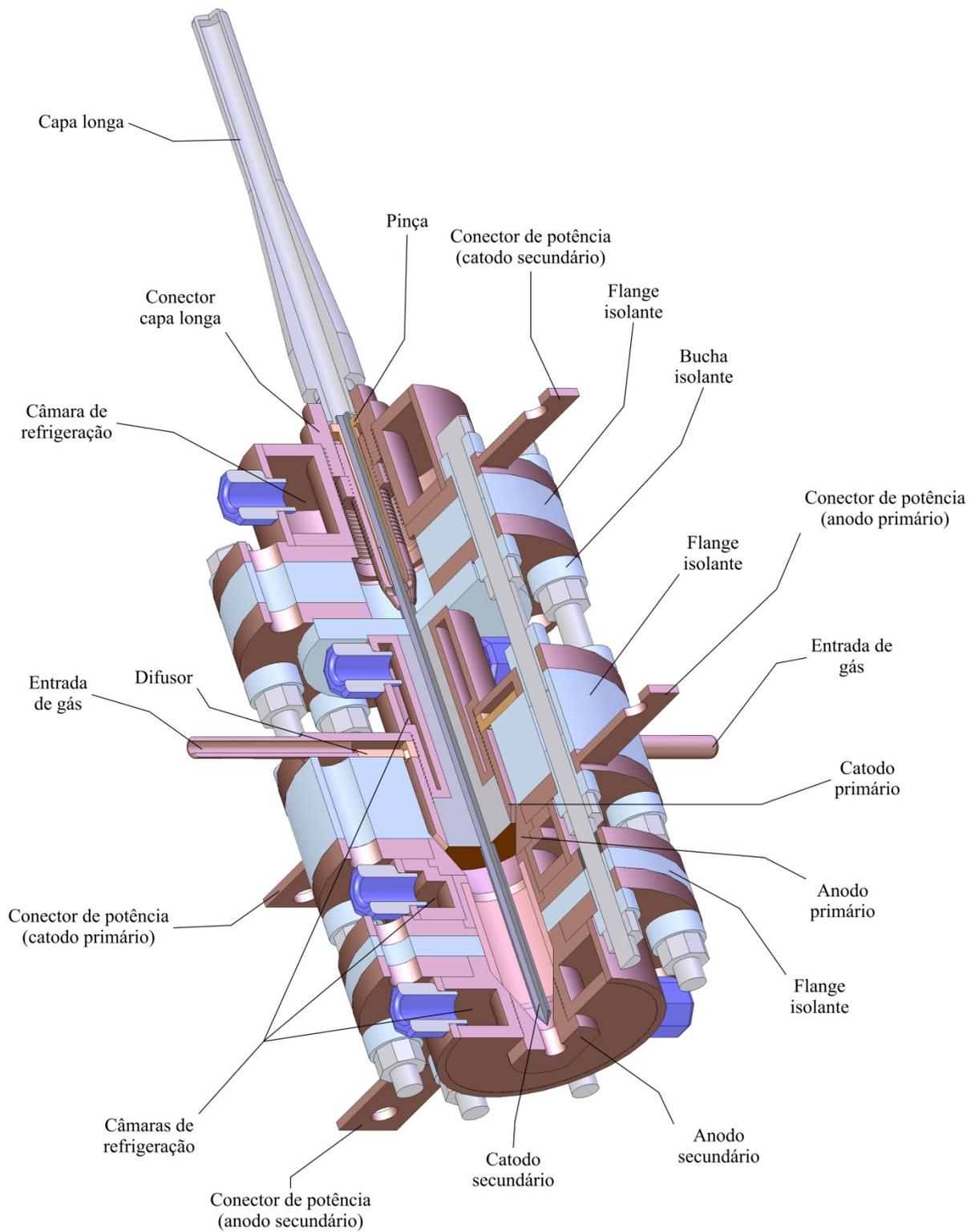
IV. A **Figura A.35** apresenta o último conjunto de peças (100) da montagem da tocha híbrida geradora de plasma, onde a câmara de refrigeração (82) é fixada aos flanges de fixação (77) (79) e ao flange isolante (78). Por fim, o anodo secundário (83) é unido à câmara de refrigeração (82) e as buchas isolantes (84) (85) (86) (87) (88) (89) são inseridas aos orifícios do flange fixador (79).



**Figura A.35.** Conjunto IV de peças montadas da tocha de plasma

V. Os engates rápidos (18) (19) (37) (38) (66) (67) (80) (81) são adicionados às câmaras de refrigeração (17) (39) (68) (82).

Finalmente, os conjuntos de peças, montados anteriormente pelas sequências I, II, III, IV e V, são unidos e fixados por porcas e parafusos formando a tocha de plasma híbrida. A **Figura A36** a Tocha de Plasma Híbrida montada.



**Figura A.36.** Tocha de Plasma Híbrida montada.

## ANEXO B

A **Tabela B.1** apresenta a matriz experimental utilizada na caracterização da tocha de plasma híbrida. Também é apresentado na **Tabela B.1** os resultados de tensão RMS entre os eletrodos primários ( $U_{P(RMS)}$ ), em V, de tensão RMS entre os eletrodos secundários ( $U_{S(RMS)}$ ), em V, do comprimento do jato de plasma ( $L$ ), em mm, e da força resultante ( $F_r$ ), em  $10^{-3}$  N.

**Tabela B.1.** Matriz experimental com resultados obtidos na caracterização da tocha de plasma híbrida.

Ordem Padrão	Ordem Execução	Parâmetros/Níveis			Respostas			
		$I_P$	$I_S$	$V_g$	$U_{P(RMS)}$	$U_{S(RMS)}$	$L$	$F_r$
141	1	100	60	7	20,1	17,36	38,582	2,156
180	2	250	30	25	27,32	17,27	45,107	10,584
126	3	250	60	14	19,88	18,83	64,98	13,328
78	4	100	60	14	22,56	18,4	35,462	3,43
62	5	250	60	14	20,42	18,25	66,121	12,936
175	6	200	60	20	19,4	15,97	35,745	9,996
146	7	150	30	14	21,94	15,85	36,312	2,744
48	8	200	60	25	19,31	14,71	32,908	11,662
83	9	150	30	20	22,58	16,28	26,175	5,292
75	10	100	50	20	22,62	19,92	23,546	4,9
127	11	250	60	20	22,48	16,59	32,34	16,17
72	12	100	40	25	22,92	19,95	28,652	2,842
13	13	100	60	7	19,69	16,95	36,879	1,47
89	14	150	50	7	21,93	15,59	38,298	2,842
54	15	250	40	14	21,25	15,91	59,858	11,956
18	16	150	30	14	21,9	15,83	32,242	2,744
179	17	250	30	20	22,21	15,32	45,696	16,072
11	18	100	50	20	22,71	19,47	23,264	4,998
82	19	150	30	14	21,89	15,85	35,461	2,842
55	20	250	40	20	20,12	15,48	52,766	15,19
135	21	100	40	20	20,74	20,55	31,489	3,92
35	22	200	30	20	25,85	17,57	46,525	7,154
130	23	100	30	14	22,7	19,47	36,597	2,744
191	24	250	60	20	22,57	16,7	31,926	16,366
68	25	100	30	25	23,25	19,61	23,262	6,566
157	26	150	60	7	23,52	20,78	39,129	2,156
5	27	100	40	7	23,32	19,02	39,149	1,176
174	28	200	60	14	21,49	15,06	40,568	4,41
154	29	150	50	14	19,28	16,68	30,355	4,802
10	30	100	50	14	21,11	19,19	29,789	1,862
124	31	250	50	25	24,38	19,33	26,397	20,58
17	32	150	30	7	23,8	15,81	46,242	1,568

Continuação da Tabela B1.

Ordem Padrão	Ordem Execução	Parâmetros/Níveis			Respostas			
		$I_P$	$I_S$	$V_g$	$U_{P(RMS)}$	$U_{S(RMS)}$	$L$	$F_r$
14	33	100	60	14	21,98	18,36	34,894	3,136
24	34	150	40	25	22,23	16,52	26,099	10,094
49	35	250	30	7	19,59	14	65,935	6,174
51	36	250	30	20	21,06	15,09	44,845	15,582
58	37	250	50	14	23,01	17,17	51,632	14,798
80	38	100	60	25	21,84	17,95	23,83	9,702
37	39	200	40	7	21,46	17,27	53,881	1,666
105	40	200	50	7	21	17,18	74,629	4,41
120	41	250	40	25	21,63	16,74	33,191	17,542
57	42	250	50	7	21,4	15,84	85,111	9,212
76	43	100	50	25	21,82	20,02	20,709	8,428
166	44	200	40	14	21,36	16,86	46,525	2,548
138	45	100	50	14	22,24	19,35	29,787	1,96
100	46	200	30	25	22	17,34	32,057	10,094
60	47	250	50	25	21,79	18,06	27,838	20,09
102	48	200	40	14	21,6	16,82	43,696	2,352
9	49	100	50	7	21,85	17,93	40	2,352
171	50	200	50	20	20,3	16,62	47,943	9,016
84	51	150	30	25	21,87	17,05	24,113	9,604
164	52	200	30	25	21,77	17,37	33,764	10,29
189	53	250	60	7	23,76	15,55	71,05	9,8
4	54	100	30	25	23,03	19,14	22,695	6,37
170	55	200	50	14	20,58	17,65	60,142	6,664
42	56	200	50	14	21,58	16,81	63,546	6,37
115	57	250	30	20	21,91	15,27	43,404	16,268
56	58	250	40	25	22,28	16,05	32,624	17,346
112	59	200	60	25	19,34	14,73	33,193	11,76
26	60	150	50	14	19,51	16,71	28,085	4,508
150	61	150	40	14	22,74	15,82	32,057	3,626
7	62	100	40	20	21,39	19,57	31,491	3,626
40	63	200	40	25	23,64	18,12	45,391	11,074
98	64	200	30	14	24,6	17,53	62,128	3,92
148	65	150	30	25	21,89	17,06	25,248	9,898
94	66	150	60	14	22,96	19,12	34,327	5,39
44	67	200	50	25	24,53	17,98	39,716	10,29
31	68	150	60	20	20,36	18,42	23,83	8,722
168	69	200	40	25	26,19	18,6	45,958	11,27
79	70	100	60	20	21,93	17,39	27,801	5,978
69	71	100	40	7	23,7	19,09	37,447	0,98
169	72	200	50	7	21,76	17,51	72,624	4,116
113	73	250	30	7	20,18	14,12	65,532	7,35
142	74	100	60	14	22,73	18,47	34,895	3,332
41	75	200	50	7	20,57	16,82	76,596	4,41
145	76	150	30	7	22,96	15,79	42,27	1,764
91	77	150	50	20	21,36	16,2	22,979	8,036

Continuação Tabela B1.

Ordem Padrão	Ordem Execução	Parâmetros/Níveis			Respostas			
		$I_P$	$I_S$	$V_g$	$U_{P(RMS)}$	$U_{S(RMS)}$	$L$	$F_r$
107	78	200	50	20	19,93	16,7	48,227	9,31
111	79	200	60	20	19,47	15,91	36,879	10,094
43	80	200	50	20	21,34	17,04	51,065	9,408
74	81	100	50	14	22,05	19,31	31,491	2,058
172	82	200	50	25	24,58	17,74	38,865	10,682
90	83	150	50	14	19,36	16,7	29,528	4,606
65	84	100	30	7	21,85	18,29	36,313	1,666
147	85	150	30	20	22,7	16,29	24,113	5,39
143	86	100	60	20	21,75	17,42	26,099	5,782
67	87	100	30	20	23,57	21,58	26,101	4,214
114	88	250	30	14	22,14	15,27	55,124	10,388
178	89	250	30	14	22,32	15,43	54,752	9,996
165	90	200	40	7	21,75	17,46	54,928	1,862
161	91	200	30	7	25,5	18,68	76,879	4,508
109	92	200	60	7	20,08	15,63	45,395	2,254
39	93	200	40	20	21,32	16,89	41,986	6,272
20	94	150	30	25	21,82	17,05	24,707	9,8
177	95	250	30	7	20,36	14,21	67,145	7,644
95	96	150	60	20	20,09	18,67	23,546	8,918
103	97	200	40	20	21,5	17,05	42,27	6,272
25	98	150	50	7	21,4	15,35	39,716	2,94
119	99	250	40	20	20,47	15,58	51,634	15,582
53	100	250	40	7	21,82	15,27	64,398	8,232
12	101	100	50	25	21,74	19,25	22,411	8,036
186	102	250	50	14	25,54	16,13	51,064	15,484
81	103	150	30	7	23,16	15,79	45,107	1,47
19	104	150	30	20	22,33	16,27	23,546	5,488
101	105	200	40	7	21,71	17,39	56,454	2,058
137	106	100	50	7	22,3	18,46	40,081	2,45
110	107	200	60	14	21,55	14,98	38,918	4,606
23	108	150	40	20	21,1	16,29	27,234	6,958
66	109	100	30	14	22,75	19,32	34,043	2,94
159	110	150	60	20	19,86	18,76	25,816	9,114
71	111	100	40	20	21,13	19,96	32,624	3,92
188	112	250	50	25	27,1	20	28,382	21,658
88	113	150	40	25	21,85	16,54	23,264	10,29
96	114	150	60	25	18,91	21,6	19,007	12,838
38	115	200	40	14	21,34	16,71	45,394	2,45
16	116	100	60	25	22,63	17,92	24,681	9,31
97	117	200	30	7	25,04	18,24	77,522	4,606
28	118	150	50	25	21,57	16,58	25,816	10,78
61	119	250	60	7	23,33	14,75	72,908	9,114
163	120	200	30	20	24,39	18,54	47,943	6,86
151	121	150	40	20	21,3	16,44	25,816	7,056
1	122	100	30	7	22,2	18,4	36,312	2,058

Continuação da Tabela B.1

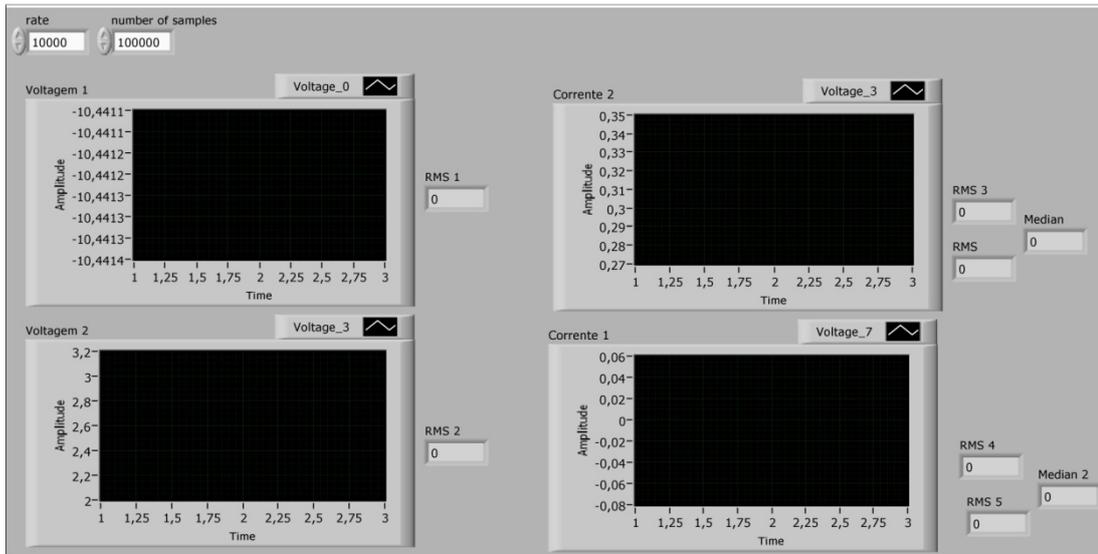
Ordem Padrão	Ordem Execução	Parâmetros			Respostas			
		$I_P$	$I_S$	$V_g$	$U_{P(RMS)}$	$U_{S(RMS)}$	$L$	$F_r$
149	123	150	40	7	21,07	15,91	40,567	2,45
59	124	250	50	20	24	16,04	28,091	16,072
93	125	150	60	7	23,22	20,21	37,73	2,646
173	126	200	60	7	20,09	15,59	46,245	2,548
99	127	200	30	20	26,41	18,34	46,809	7,154
162	128	200	30	14	26,29	17,69	63,285	3,92
73	129	100	50	7	22,05	18,29	37,063	2,646
185	130	250	50	7	21,06	17,39	84,303	9,408
176	131	200	60	25	19,36	14,74	33,48	11,956
125	132	250	60	7	23,64	15,41	71,49	9,604
182	133	250	40	14	21,32	16,74	59,324	11,76
192	134	250	60	25	23,39	18,46	33,76	18,62
140	135	100	50	25	21,86	20,14	20,995	8,232
118	136	250	40	14	21,33	10,1	60,432	11,662
160	137	150	60	25	18,94	21,75	20,144	12,936
116	138	250	30	25	26	16,8	45,677	20,482
33	139	200	30	7	24,78	17,44	80,284	4,41
8	140	100	40	25	22,76	19,58	27,519	2,744
133	141	100	40	7	23,79	18,78	38,014	1,274
63	142	250	60	20	22,27	16,3	33,463	15,68
155	143	150	50	20	21,36	15,94	22,994	7,644
15	144	100	60	20	21,79	17,34	26,667	5,88
108	145	200	50	25	24,51	17,83	38,591	10,29
129	146	100	30	7	21,79	18,48	34,326	1,764
152	147	150	40	25	21,82	16,55	22,919	10,29
87	148	150	40	20	21,29	16,37	25,817	6,86
131	149	100	30	20	23,49	21,64	29,22	4,606
2	150	100	30	14	22,67	20,54	34,894	2,646
153	151	150	50	7	21,72	15,68	39,914	3,038
50	152	250	30	14	21,35	14,52	53,416	10,388
92	153	150	50	25	20,79	16,53	24,965	10,584
45	154	200	60	7	20,05	15,71	47,092	2,156
21	155	150	40	7	21,06	15,54	38,865	2,352
132	156	100	30	25	23,61	19,69	22,695	6,664
183	157	250	40	20	20,53	15,65	51,065	15,778
144	158	100	60	25	21,47	17,91	21,844	9,702
156	159	150	50	25	20,61	16,52	24,195	10,584
3	160	100	30	20	23,06	19,82	29,22	4,41
106	161	200	50	14	21,18	17,36	61,845	6,468
167	162	200	40	20	21,16	17,1	42,554	6,468
64	163	250	60	25	22,59	18,07	34,043	18,228
121	164	250	50	7	21,2	16,83	83,405	9,702
46	165	200	60	14	21,6	15,17	41,418	4,214
128	166	250	60	25	23,08	18,35	30,419	18,032
86	167	150	40	14	22,83	15,81	32,908	3,724

Continuação da Tabela B.1

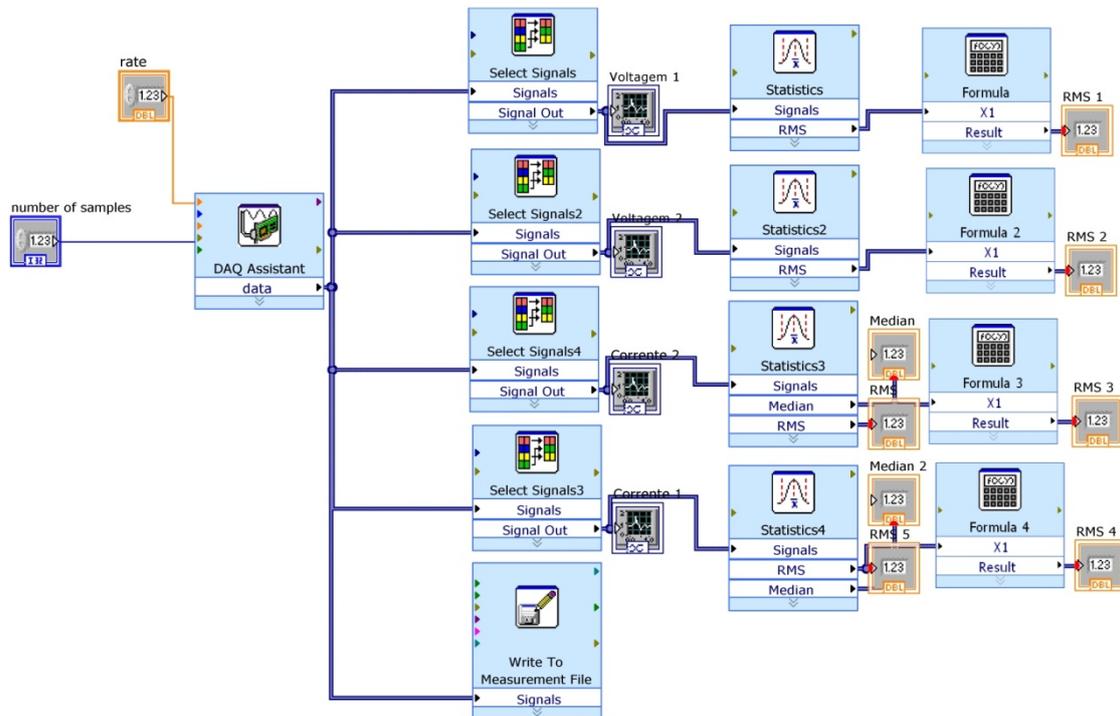
Ordem Padrão	Ordem Execução	Parâmetros			Respostas			
		$I_P$	$I_S$	$V_g$	$U_{P(RMS)}$	$U_{S(RMS)}$	$L$	$F_r$
85	168	150	40	7	21,19	15,8	40,852	2,744
36	169	200	30	25	23,15	17,45	32,909	10,192
117	170	250	40	7	21,43	15,53	62,128	8,624
187	171	250	50	20	26,39	16,43	29,22	16,268
34	172	200	30	14	18,23	17,27	61,56	3,822
134	173	100	40	14	21,58	18,82	38,865	1,862
139	174	100	50	20	22,31	20,13	22,411	4,9
123	175	250	50	20	26,2	16,29	28,654	16,17
32	176	150	60	25	18,68	21,56	19,291	12,642
27	177	150	50	20	21,37	16,34	22,128	7,448
6	178	100	40	14	22,27	18,42	37,447	1,96
122	179	250	50	14	24,8	16,53	53,928	14,994
70	180	100	40	14	21,96	18,64	38,298	1,666
190	181	250	60	14	19,71	19,13	68,681	13,426
47	182	200	60	20	19,57	15,86	36,313	9,996
30	183	150	60	14	22,85	18,84	32,624	5,096
104	184	200	40	25	25,88	18,28	45,677	10,878
136	185	100	40	25	23,16	20,02	26,95	2,744
52	186	250	30	25	24,38	15,96	44,54	20,188
158	187	150	60	14	22,99	19,03	36,881	5,684
184	188	250	40	25	21,6	16,25	35,182	17,738
77	189	100	60	7	19,88	17,23	37,73	1,96
181	190	250	40	7	20,93	15,62	66,099	8,918
29	191	150	60	7	21,53	19,23	40,851	2,45
22	192	150	40	14	22,95	15,76	30,638	3,332

## ANEXO C

A **Figura C.1** e a **Figura C.2** mostram, respectivamente, o painel de controle e o diagrama de blocos desenvolvidos em Labview para aquisição de dados (Intensidade de corrente elétrica e tensão entre os eletrodos).

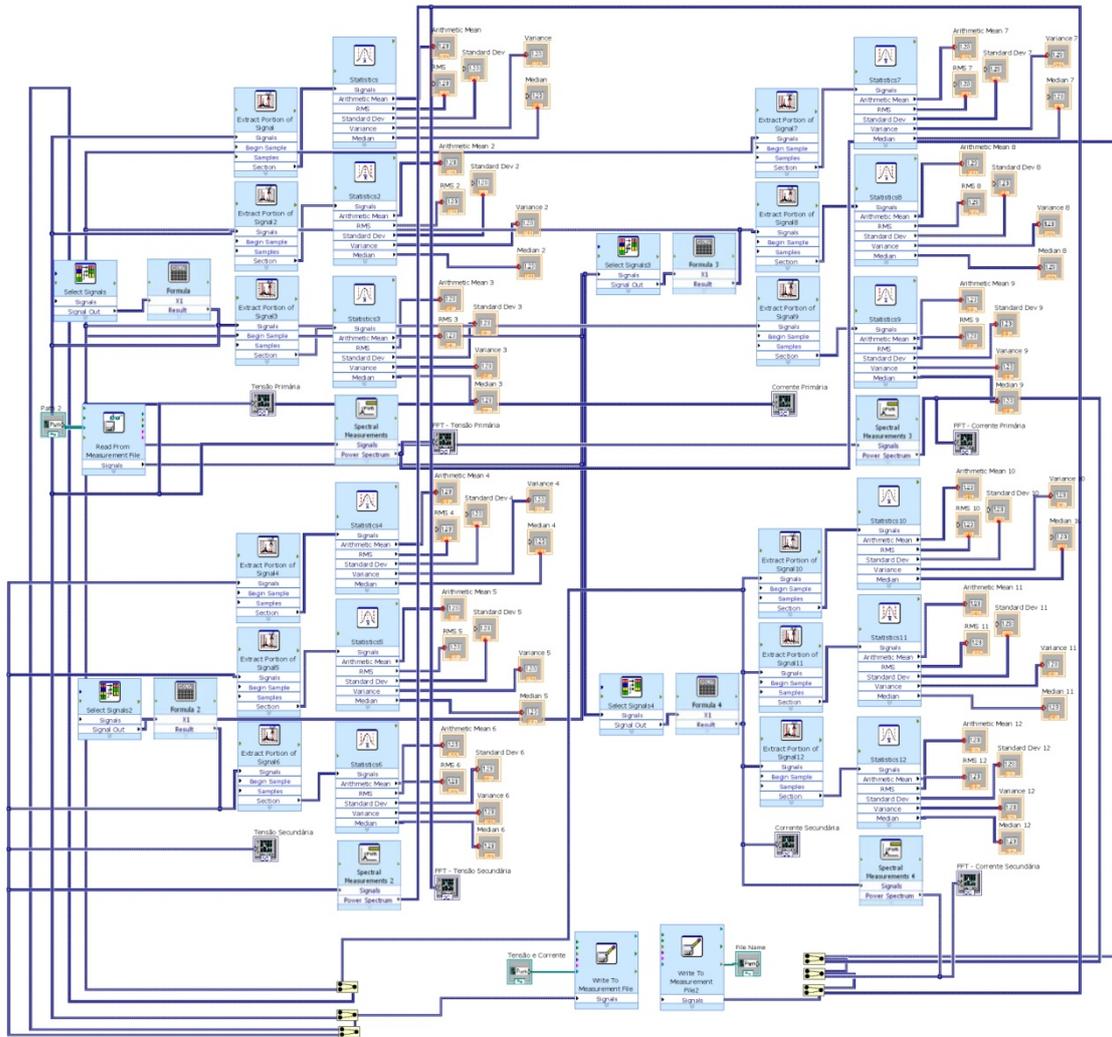


**Figura C.1.** Painel frontal de controle utilizado para aquisição de dados.

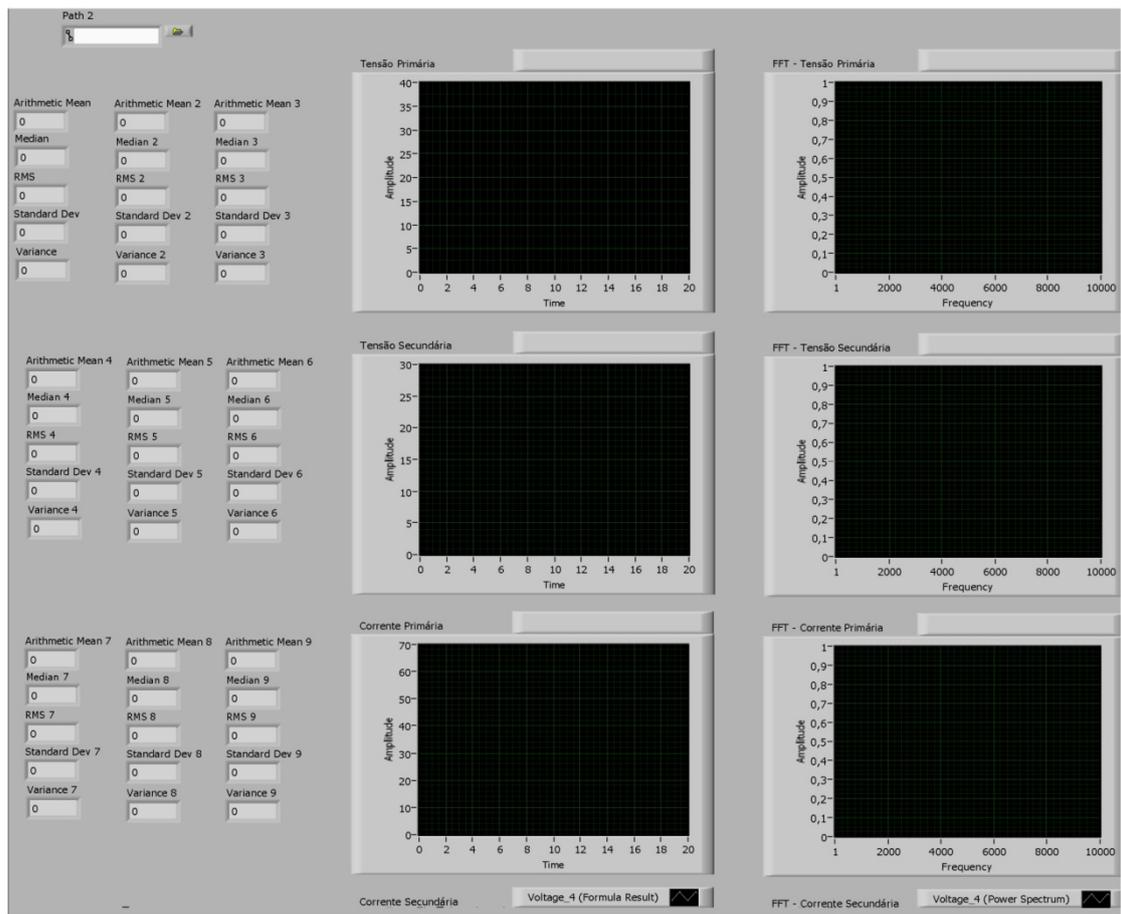


**Figura C.2.** Diagrama de blocos em Labview para aquisição de dados.

A **Figura C.3** e a **Figura C.4** mostram, respectivamente, o diagrama de blocos e o painel frontal de controle, os quais foram desenvolvidos em Labview para leitura e processamento dos dados.



**Figura C.3.** Diagrama de blocos para leitura e processamento de dados.



**Figura C.4.** Painel frontal de controle para leitura e processamento de dados.